

力学、热学实验

目录

力学、热学实验	- 0 -
绪 论	- 1 -
实验一：液体比热容测量	- 4 -
实验二：空气比热容比测定	- 12 -
实验三：杨氏模量测定	- 19 -
实验四：声速测定实验	- 24 -
实验五：多普勒效应综合实验	- 35 -
实验六 声波和振动	- 50 -
实验七：摆特性的研究	- 63 -
实验八：旋转液体综合实验	- 74 -
实验九：液体电导率测量	- 84 -
实验十：光敏传感器的光电特性研究	- 92 -

绪 论

第一节 物理实验课的地位和任务

一、物理实验的重要性

物理学是人类在探索大自然现象及其规律过程中形成的以实验为基础的一门科学。物理学中每个概念的提出，每个定律的发现，每个理论的建立，都以坚实、严格的实验为基础，而且还要经受实验的进一步考验。物理学发展过程中，许多关键问题，最后都要诉诸实验。例如，杨氏的光干涉实验证实了光的波动说。法拉第发现了电磁感应现象，进而得出电磁感应定律和其它几个实验定律。麦克斯韦系统总结了电磁学的成就，提出著名的电磁场理论。赫兹的电磁波实验又检验和证实了电磁场理论的正确性。密立根的光电效应证实了爱因斯坦的光量子假说。可以说，在物理学中，每个概念的建立，每个定律的发现，无不有着坚实的实验基础。

从现代科学的观点来看，实验是研究自然规律与改造客观世界的基本手段。物理实验既为开拓新理论、新领域奠定基础，又是丰富和发展物理学应用的广阔天地。尤其是核物理、激光、电子技术和计算机等现代化科学技术的发展，更反映了物理实验技术发展的新水平。

物理学是一门理论与实验高度结合的科学，绝大部分物理理论首先是从实验现象突破后发展起来的，而相当部分物理学工作者主要从事实验物理方面的工作。因此物理实验教学，特别是基础的普通物理实验教学，在理工医科人才的应用能力培养、科学素质提高、科学态度的养成等方面发挥了极其重要的作用。

作为担负培养德、智、体全面发展的理论研究性人才或高级工程技术人才的高等学校，不仅要使学生具备比较深广的理论知识，而且还要使学生具有从事科学实验的较强能力，以适应科学技术不断进步和社会主义建设迅速发展的需要。

二、物理实验课程的地位、作用和任务

基础物理实验是为高等学校物理学、非物理学专业学生进行科学实验基本训练独立开设的一门必修基础课程。是学生进入大学后接受系统实验方法和实验技能训练的开端。物理实验室是各类专业对学生进行科学训练的重要基地。

本课程的具体任务是：

1. 通过对物理现象的观察、分析和对物理量的测量，学习物理实验知识，加深对物理学原理、基本概念的理解。
2. 培养和提高学生的科学实验能力。其中包括：
 - (1) 能够阅读实验教材和资料，作好实验前的准备。
 - (2) 能够借助教材或仪器说明书正确使用常用仪器，完成常用物理量的测量。
 - (3) 能够运用物理学理论对实验现象进行初步分析判断。
 - (4) 能够正确记录和处理实验数据，掌握处理实验数据的一些基本方法。
 - (5) 学会绘制曲线，分析实验结果，撰写合格的实验报告。

(6) 能够进行基础性测量装置的搭建, 完成简单的设计性实验。

3. 培养与提高学生的科学实验素养: 要求学生具有理论联系实际和事实求是的科学作风, 严肃认真的工作态度, 主动研究的探索精神, 相互协作的团队精神和遵守纪律、爱护公共财产的良好品德。

第二节 物理实验课的教学程序

1. 课前预习

课前预习是做好物理实验的基础, 为保证实验的顺利进行, 达到预期的实验效果, 课前预习应做到:

仔细阅读本次实验的教材和有关资料, 正确理解实验原理及方法, 了解实验的内容、步骤、要求及实验所用仪器、设备的工作原理、使用方法及注意事项等;

写出实验预习报告, 内容包括: 实验题目、实验目的、实验原理简述、实验电路图、公式、实验内容以及所需的纸、笔、记录表格等。

2. 学生进入实验室后, 应遵守实验室规则, 不要大声喧哗, 不要乱动设备。实验前要认真听指导教师对有关实验原理、仪器使用、应掌握的重点和注意的问题等方面的讲授, 尤其要注意听老师讲的自己在预习中没有弄懂的问题、书上没有介绍的内容及有关仪器的调试技巧和人身安全方面的规定。

通过预习和听讲, 做到在实验开始前就在脑子里形成本次实验的基本思路, 做到心中有数, 使实验能顺利进行并取得好的效果。

3. 进行实验: 实验前, 首先应检查核对实验仪器, 熟悉仪器设备及实验用元器件的性能, 将各种仪器按照合理的便于操作的位置摆放。电磁学实验的仪器和元器件, 应按线路的顺序、便于观察、测量和读数的原则摆放。

4. 实验过程中, 要认真观测实验现象, 精心操作, 完整记录所有数据, 注意有效数字和单位。记录数据不允许用铅笔, 所记录的原始数据不可随意修改。若记录的数据确实有误, 应将其划掉, 在其旁写上正确数据。要做到如实、及时地记录实验数据及观测到的现象。热学实验还要记录温度、湿度、气压等环境条件。

4. 实验结束后, 不要急于收拾仪器, 应该先把实验的原始数据交给指导教师审查, 经老师签字认可后, 方可收拾整理好仪器, 结束实验。

第三节 实验报告的规范式写法

做好实验分为三个环节, 即课前预习、进行实验和书写实验报告, 在做好前两项工作的基础上, 写好实验报告就是一个至关重要的问题。

写实验报告是一个对实验原理更加深入理解的过程，是对实验内容、实验步骤的一个重新回顾，是对整个实验过程的一个全面总结，也是为将来进行科学研究，写好科学论文打下一个良好踏实的基础。

实验报告要求用规范的实验报告纸书写，文字叙述要简练，字迹要清晰整洁，作图要正规，数据表格要齐全。

实验报告要求用规范的实验报告纸书写，文字叙述要简练，字迹要清晰整洁，作图要正规，数据表格要齐全。

实验报告包括以下内容：

1. 姓名、学号、学院、系、年级、专业、同组者、日期
2. 科目、实验题目
3. 实验目的
4. 实验仪器
5. 实验原理（简述实验的理论依据、公式及实验原理示意图等）。
6. 实验步骤内容

（1）实验过程的每一个步骤都要认真写出来。

（2）原始数据要重新经过整理后在实验报告中以表格的形式列出来，不能以原始数据记录纸代替。

（3）实验数据要按照实验要求的方式处理计算，要写出具体的计算步骤。实验结果得出后要以正确的形式表达出来。要有必要的误差分析，注意有效数字和单位。

（4）图形要用坐标纸、铅笔清晰地画出来，或者用作图软件电脑打印。

（5）经教师签字的原始数据纸张要附在实验报告后面。

7. 总结讨论

要对实验教材后面的思考题进行讨论，对实验中遇到的现象进行分析，对发现的问题提出自己的见解及改进的思路，以便对实验教学进行不断的改进。

实验报告完成后，要完整有序地订在一起，以便在以后的传递中不被丢失和完整的保存。

实验一：液体比热容测量

一、实验背景、

液体的比热容是一个重要的热学物理量。用冷却法测液体比热容实验在国内许多综合性大学、工科大学作为基础热学实验开设。

FD-LCD-A 液体比热容实验仪是通过冷却比较法测定液体比热容的实验装置。它具有以下优点：

1. 设计了单片机控制的数字式精密温度测量仪，该温度测量仪可同时测量实验装置内筒和外筒温度，并有定时报时、自动保存数据功能，有利于实验测量准确读数或查阅实验数据。
2. 对待测液体量杯及外围恒温装置进行优化设计，使更好地满足待测液体自然冷却的规律，减小实验误差。

二、实验目的

1. 用冷却法测定液体的比热容，并了解比较法的优点和条件；
2. 最小二乘法求经验公式中直线的斜率；
3. 用实验的方法考察热学系统的冷却速率同系统与环境间温度差的关系。

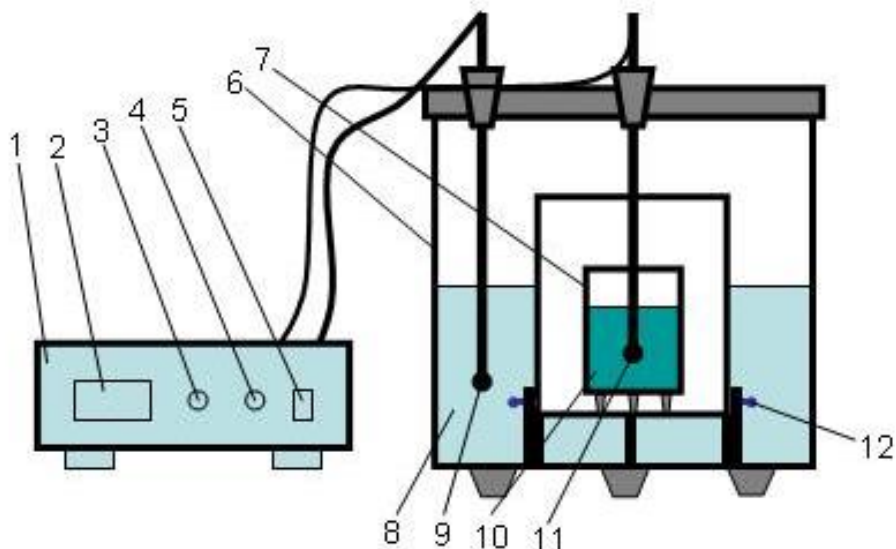


图 1 实验装置示意图

1.实验主机 2.温度显示表 3.查阅按钮 4.复位按钮 5.电源开关 6.实验外筒 7.实

验内筒 8.环境水 9.传感器 T_A 10.被测液体 11.传感器 T_b 12.坚固螺丝

仪器主要由实验容器和实验主机组成，其示意图如图所示（图 1）。实验容器是具有内、外筒的专用量热器。外筒是一个很大的有机玻璃筒，外筒及其中水热容量比量热器热容量大得相当多，以保持恒温，并以此作为实验的“环境”。内筒是用金属铜制作的，内盛待测液体(或已知液体)，内筒和液体(或已知液体)组成我们所要考虑的系统。

该装置基本上满足了实验系统需在温度恒定环境中冷却的条件。

三、 实验原理

比热容的概念

由牛顿冷却定律，一个表面温度为 θ 的物体，在温度为 θ_0 的环境中自然冷却 ($\theta > \theta_0$)，在单位时间里流物体散失的热量 $\delta q / \delta t$ 与温度差 $\theta - \theta_0$ 成正比关系：

$$\frac{\delta q}{\delta t} = k(\theta - \theta_0)$$

当物体温度的变化是准静态过程时，上式可改写为

$$\frac{\delta T}{\delta t} = \frac{k}{C_s} (\theta - \theta_0) \quad (1)$$

(1)式中 $\delta\theta/\delta t$ 为物体的冷却速率， C_s 为物质的热容， k 为物体的散热常数，与物体的表面性质、表面积、物体周围介质的性质和状态以及物体表面温度等许多因素有关， θ 和 θ_0 分别为物体的温度和环境的温度， k 为负数， $\theta - \theta_0$ 的数值应该很小，大约在 $10-15^\circ\text{C}$ 之间。

如果在实验中使环境温度 θ_0 保持恒定(即 θ_0 的变化比物体温度 θ 的变化小很多)，则可以认为 θ_0 是常量，对式(1)进行数学处理，可以得到下述公式：

$$\ln(\theta - \theta_0) = \frac{k}{C_s} t + b \quad (2)$$

式中 b 为(积分)常数。

可以将式(2)看成为两个变量的线性方程的形式：自变量为 t ，应变量为 $\ln(\theta - \theta_0)$ ，直线斜率为 k/C_s ，本实验利用式(2)进行测量，实验方法是：通过比较两次冷却过程，其中一次含有待测液体，另一次含有已知热容的标准液体样品，并使这两次冷却过程的实验条件完全相同，从而测量式(2)中未知液体的比热容。

在上述实验过程中，使实验系统进行自然冷却，测出系统冷却过程中温度随时间的变化关系，并从中测定未知热学参量的方法，叫做冷却法；对两个实验系统在相同的实验条件下进行对比，从而确定未知物理量，叫做比较法。比较法作为一种实验方法，有广泛的应用。

利用冷却法和比较法来测定待测液体(如饱和食盐水)的热容的具体方法如下：

利用式(2)分别写出对已知标准液体(即水)和待测液体(即饱和食盐水)进行冷却的公式，如下：

$$\ln(\theta - \theta_0)_w = \frac{k'}{C_s'} t + b' \quad (3)$$

$$\ln(\theta - \theta_0)_s = \frac{k''}{C_s''} t + b'' \quad (4)$$

以上两式中 C_s' 和 C_s'' 分别是系统盛水和盐水时的热容。如果能保证在实验中用同一个容器分别盛水和盐水，并保持在这两种情况下系统的初始温度、表面积和环境温度等基本相同，则系统盛水和盐水时的系数 k' 与 k'' 相等，即

$$k' = k'' = k$$

令 S' 和 S'' 分别代表由(3)式和(4)式作出的两条直线的斜率，即

$$S' = \frac{k}{C_s'}, \quad S'' = \frac{k}{C_s''}$$

可得

$$S' C_s' = S'' C_s'' \quad (5)$$

式中 S' 和 S'' 的值可由最小二乘法得出, 热容 C'_S 和 C''_S 分别为

$$C'_S = m'c' + m_1c_1 + m_2c_2 + \delta C',$$

$$C''_S = m''c_x + m_1c_1 + m_2c_2 + \delta C'',$$

其中 m' , m'' , c' , c_x 分别为水和盐水的质量及比热容; m_1 , m_2 , c_1 , c_2 分别为量热器内筒和搅拌器的质量及比热容; $\delta C'$ 和 $\delta C''$ 分别为温度计浸入已知液体和待测液体部分的等效热容。由于数字温度计测温按着浸入液体部分的等效热容相对系统的很小, 故可以忽略不计, 利用式(5), 有

$$c_x = \frac{1}{m''} \left[\frac{S' C'}{S''} - (m_1 c_1 + m_2 c_2) \right] \quad (6)$$

其中水的比热容为

$$c' = 4.18 \times 10^3 J / (kg \cdot K)$$

量热器内筒和搅拌器通常用金属铜制作, 其比热容为

$$c_1 = c_2 = 0.389 \times 10^3 J / (kg \cdot K)$$

四、 实验仪器

仪器主要由实验容器和实验主机组成, 如下图所示(图 2)。实验容器是具有内、外筒的专用量热器。外筒是一个很大的有机玻璃筒, 外筒及其中水热容量比量热器热容量大得相当多, 以保持恒温, 并以此作为实验的“环境”。内筒是用金属铜制作的, 内盛待测液体(或已知液体), 内筒和液体(或已知液体)组成我们所要考虑的系统。该装置基本上满足了实验系统需在温度恒定环境中冷却的条件。



图 2 FD-LCD-A 型液体比热容实验仪

五、 实验内容

1. 用冷却法测定饱和食盐水的热容

(1) 将外筒冷却水加至适当高度(要求 θ_0 的波动幅度不超过 $\pm 0.5^\circ\text{C}$)。

(2) 用内部干燥的量热器内筒取纯净水。

要求: 纯净水体积约占内筒的 2/3 体积、温度 θ 约比 θ_0 高 10—15 $^\circ\text{C}$ 。称其质量后, 放入隔离筒, 开始实验。每隔 1min 分别记录一次纯净水温度 θ 和外筒冷却水的温度 θ_0 , 共测 20min。

(3) 用清洗过的内筒盛取饱和食盐水。

要求: 食盐水的体积约占内筒的 2/3 体积、饱和食盐水的初温与纯净水初温之差不超过 1 $^\circ\text{C}$ 。称其质量后, 放入隔离筒, 开始实验。每隔 1min 分别记录一次食盐水温度 θ 和外筒冷却水的温度 θ_0 , 共测 20min。

2. 对数据处理的要求

(1) 在同一张直角坐标纸中, 对纯净水及盐水分别作“ $\ln(\theta - \theta_0) - t$ ”图, 检验得到的是否为一条直线。如果是, 则可以认为检验了式(2), 并间接检验了式(1), 也就是说, 被研究的系统的冷却速率同系统与环境之间温度差成正比。

(2) 对水和盐水分别取 $\ln(\theta - \theta_0)$ 及相应的 t 的数据, 用最小二乘法分别求出两条直线的斜率 S' 和 S'' , 并由此得出未知饱和食盐水的热容 c_x 。

3. 提示: 仪器的联机软件可以让实验过程简化。通过仪器内置的串行接口和电脑联机, 运行联机软件。联机软件每隔固定时间, 自动从实验仪获取数据。实验后, 可以通过该软件对数据进行处理。具体的使用方法, 请看联机软件的使用手册。

六、 注意事项

- 1) 要避免直接用火对内筒加热, 这样会引起内筒表面的氧化, 以致其表面性质发生改变, 从而使散热常数 k 发生变化。
- 2) 待测液体与水的初温相关不超过 1°C , 它们所处的环境温度应该相同, 体积应取得大致相等。
- 3) 实验过程中, 通过旋动两个温度传感器搅拌液体, 可以使其温度均匀。
- 4) 被测液体温度较高时, 谨防烫伤。
- 5) 实验结束后, 外筒盖要翻过来放置, 使两个探头外露在空气中, 避免腐蚀。也必须把内筒用自来水清洗干净, 倒立放置在外筒盖上。

附录: 仪器的技术指标和功能简介

1. 电源要求

仪器对工作电源的要求是: 单相三线 $220\text{V} \pm 5\%$ 50Hz。

2. 定时报时功能

开机运行后, 主机会在每分钟的最后两秒启动内置的蜂鸣器发声, 表示一分钟时间到了。

3. 数字温度传感器

仪器配备有两个 DS18B20 温度传感器，温度量程 0–100℃，显示分辨率：0.1℃。这两个温度传感器分别测量内筒液体温度 TA、外筒液体温度 Tb。

实验时，按照仪器后面板的标签，把〔外筒温度传感器〕放入外筒“环境水”中，把〔内筒温度传感器〕放入内筒被测液体中。开机运行后，温度显示表会自动切换显示 TA、Tb 的值。

切换的规律：每分钟的前 58 秒显示 TA，最后 2 秒显示 Tb。显示 TA 时，第一位数码管显示成“A”。显示 Tb 时，第一位数码管显示成“b”。**注意：显示 Tb 时，蜂鸣器会发声报警，不要惊慌。**

4. 自动保存数据功能

实验过程中，仪器有自动记录温度的功能：开机或复位的前 20 分钟，仪器会每分钟的最后一秒自动保存 TA 的温度值。实验结束后，您在仪器前面板上按“查询”键，就可以查阅这些数据。

5. 数据查阅功能

每次实验开始的前 20 分钟，在每分钟末，TA 值被自动保存一次。

实验结束后，按“查询”键，即可依次读取保存的 TA 值。查询时，第一位数码管表示温度值的编号。举例：

“0” 表示第 1 分钟末时记录的 TA 值

“1” 表示第 2 分钟末时记录的 TA 值…

“8” 表示第 9 分钟末时记录的 TA 值

“9” 表示第 10 分钟末时记录的 TA 值

……

“0.” 表示第 11 分钟末时记录的 TA 值

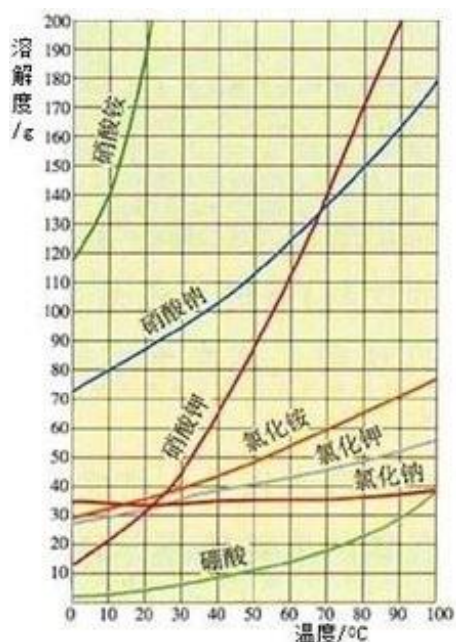
“1.” 表示第 12 分钟末时记录的 TA 值…

“8.” 表示第 19 分钟末时记录的 TA 值

“9.” 表示第 20 分钟末时记录的 TA 值

按一下“查询”键，则读取下一个 TA 值。读取 20 个后，从第一个重新读取。查询完毕后，按“复位”键可重新实验。同时，所有 TA 值自动清除。

注意：实验过程中按下“查询”或“复位”键，会使当前的实验夭折。



氯化钠的溶解度(克 g/100 克 g 水)

- 0 摄氏度：35.7g 10 摄氏度：35.8g
- 20 摄氏度：36.0g
- 30 摄氏度：36.3g 40 摄氏度：36.6g
- 50 摄氏度：37.0g
- 60 摄氏度：37.3g 70 摄氏度：37.8g
- 80 摄氏度：38.4g
- 90 摄氏度：39.0g 100 摄氏度：39.8g

溶质 \ 溶解度 g/100g 水	温度/°C						
	10	20	30	40	50	60	70
NaCl	35.8	36.0	36.3	36.6	37.0	37.3	37.8
NH ₄ HCO ₃	15.8	21.0	27.0				
NaHCO ₃	8.2	9.6	11.1	12.7	14.4	16.4	
NH ₄ Cl	33.3	37.2	41.4	45.8	50.4	55.2	60.2

mantenb.com

实验二：空气比热容比测定

一．实验目的

1. 用绝热膨胀法测定空气的比热容比。
2. 观测热力学过程中状态变化及基本物理规律。
3. 学习气体压力传感器和电流型集成温度传感器的原理及使用方法。

二．实验原理

对 1 mol 理想气体的定压比热容 C_p 和定容比热容 C_v 之关系由下式表式：

$$C_p - C_v = R \quad (1)$$

(1) 式中，R 为气体普适常数。气体的比热容比 γ 值：

$$\gamma = \frac{C_p}{C_v} \quad (2)$$

气体的比热容比 γ 现称为气体的绝热系数，它是一个重要的物理量， γ 值经常出现在热力学方程中。测量 γ 值的仪器如图 1 所示，以到达状态 II 后贮气瓶内剩余的空气作为研究对象，进行如下实验过程：（其中 P_0 为环境大气压强、 T_0 为室温， V_2 表示贮气瓶体积）

- 1) 先打开放气阀 C_2 ，贮气瓶与大气相通，再关闭 C_2 ，瓶内充满与周围空气等温等压的气体。
- 2) 打开充气阀 C_1 ，用充气球向瓶内打气，充入一定量的气体，然后关闭充气阀 C_1 。此时瓶内空气被压缩，压强增大，温度升高。等待内部气体温度稳定，且达到与环境温度相等，此时的气体处于状态 I (P_1, V_1, T_0)。（注： V_1 小于 V_2 ，此时瓶中还有研究对象以外气体）
- 3) 迅速打开放气阀 C_2 ，使瓶内气体与大气相通，当瓶内压强降至 P_0 时，立刻关闭放气阀 C_2 ，由于放气过程较快，气体来不及与外界进行热交换，可以近似认为是一个绝热膨胀过程。此时，气体由状态 I (P_1, V_1, T_0) 转变为状态 II (P_0, V_2, T_1)。

4) 由于瓶内气体温度 T_1 低于室温 T_0 ，所以瓶内气体慢慢从外界吸热，直至达到室温 T_0 为止，此时瓶内气体压强也随之增大为 P_2 ，气体状态变为 III (P_2, V_2, T_0)。从状态 II 至状态 III 的过程可以看作是一个等容吸热的过程。

状态 I → 状态 II → 状态 III 的过程如图(a)、(b)所示。

状态 I → 状态 II → 状态 III 的过程如图(a)、(b)所示。

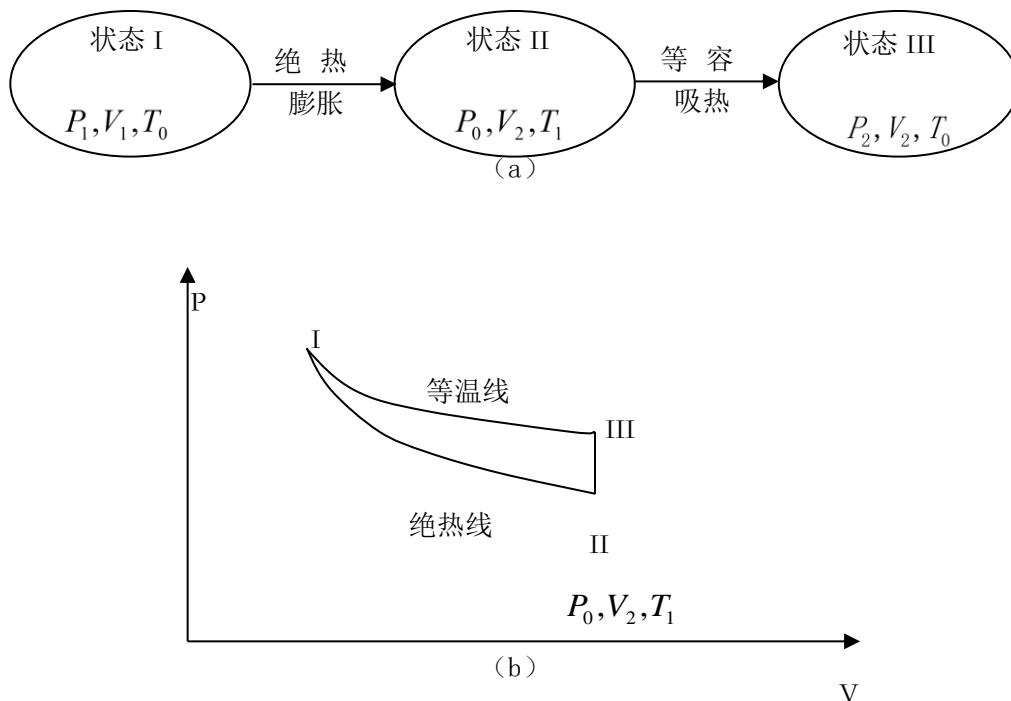


图 1 实验过程状态分析

状态 I → 状态 II 是绝热过程，由绝热过程方程得

$$P_1 V_1^\gamma = P_0 V_2^\gamma \quad (3)$$

状态 I 和状态 III 的温度均为 T_0 ，由气体状态方程得

$$P_1 V_1 = P_2 V_2 \quad (4)$$

合并式 (3)、(4)，消去 V_1 、 V_2 得

$$\gamma = \frac{\ln P_1 - \ln P_0}{\ln P_1 - \ln P_2} = \frac{\ln P_1 / P_0}{\ln P_1 / P_2} \quad (5)$$

由式（5）可以看出，只要测得 P_0 、 P_1 、 P_2 就可求得空气的 γ 。

AD590 测温原理：

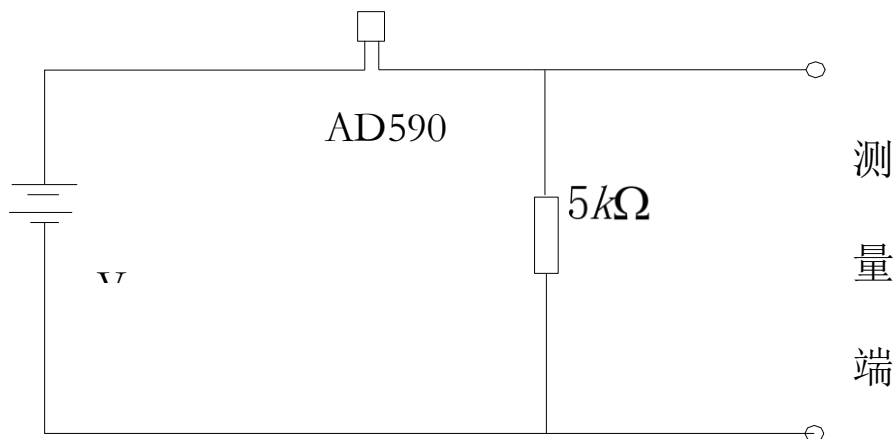


图 2 AD590 温度传感器测温原理图

AD950 接 6V 直流电源后组成一个稳流源，见图 2，它的测温灵敏度为 $1 \mu\text{A}/^\circ\text{C}$ ，若串接 $5\text{k}\Omega$ 电阻后，可产生 $5\text{mV}/^\circ\text{C}$ 的信号电压，接 $0\sim 2\text{V}$ 量程四位半数字电压表，灵敏度即可达到 0.02°C 。

三 . 实验仪器

本仪器主要由三部分组成：机箱（含数字电压表二只）、贮气瓶、传感器两只（电流型集成温度传感器 AD590 和扩散硅压力传感器各一只）



图 3 空气比热容比测定仪实验装置

机箱（含数字电压表二只）、贮气瓶、传感器两只（电流型集成温度传感器 AD590 和扩散硅压力

传感器各一只)

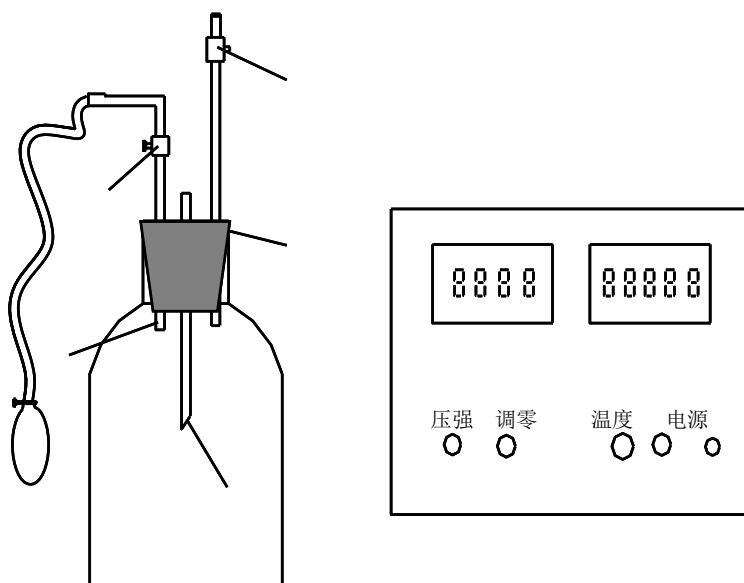


图4 空气比热容比测定实验装置图

1. 进气活塞 C_1
2. 放气活塞 C_2
3. AD590 传感器
4. 气体压力传感器
5. 704 胶粘剂

四 . 实验内容

1. 按图2接好仪器的电路, AD590的正负极不能接错。用Forton式气压计测定大气压强 P_0 , 用水银温度计测环境室温 θ_0 。开启电源, 预热20分钟后, 用调零电位器调节零点, 把三位半数字电压表示值调到0, 记录反映温度的电压值 T_0'
2. 把活塞 C_2 关闭, 活塞 C_1 打开, 用打气筒把空气稳定地徐徐压入贮气瓶B内, 用压力传感器和AD590温度传感器测量空气的压强和温度, 当瓶内压强稳定时, 记录压强 P_1' 和温度 T_1' 值 (T_1' 近似为 T_0' , 但往往略高于 T_0' , 请读者自己思考为什么。)
3. 突然打开活塞 C_2 , 当贮气瓶的空气压强降低至环境大气压强 P_0 时 (这时放气声消失), 迅速关闭活塞 C_2 。
4. 当贮气瓶内空气的温度上升至室温 θ_0 时记下贮气瓶内气体的压强 P_2' 。(因实验过程中室温可能

有变化，故只需等瓶内压强 P_2' 稳定即可记录，此时瓶中温度 T_2' 近似为 T_0' ）

5. 用公式（5）进行计算，求得空气比热容比值。

【实验数据】（注：以下数据不作为仪器验收标准，仅供实验时参考）

$$P_1 = P_0 + P_1' / 2000; P_2 = P_0 + P_2' / 2000; \text{其中 } P_0 \text{ 单位 Pa; } P_1' \text{ 和 } P_2' \text{ 单位为 mV, } P_1' / 2000 \text{ 和}$$

$P_2' / 2000$ 的单位为 $1 \times 10^5 Pa$

$$\gamma = \frac{\log(P_1 / P_0)}{\log(P_1 / P_2)} \quad (\text{200mV 读数相当于 } 1.000 \times 10^4 Pa)$$

P_0 ($10^5 Pa$)	P_1' (mV)	T_1' (mV)	P_2' (mV)	T_2' (mV)	P_1 ($10^5 Pa$)	P_2 ($10^5 Pa$)	γ
1.0171	108.4	1478.5	25.8	1474.8	1.0713	1.0300	1.32
	106.1	1477.8	29.3	1475.2	1.0702	1.0318	1.39
	111.1	1478.2	33.9	1477.9	1.0727	1.0341	1.45
	116.9	1478.9	28.4	1476.1	1.0756	1.0313	1.33

$\gamma = 1.373$, 理论值 $\gamma = 1.402$, 百分差很小, 为 2.1% (注意: 放气时间太长或太短都将引入较大误差)。

五 . 注意事项

1. 实验中，硅压力传感器请勿用手压，以免影响测量准确性。
2. 玻璃活塞如有漏气，可用乙醚将油脂擦干净，重新涂真空油脂。
3. 橡皮塞与玻璃瓶或玻璃管接触部位等处有漏气只需涂 704 硅化橡胶，即可防止漏气。
4. 由于每只硅压力传感器参数稍有差异，每台仪器有唯一传感器配套（上有编号对应），禁止将仪器与压力传感器交错使用。
5. 实验内容 3 打开活塞 C_2 放气时，当听到放气声结束应迅速关闭活塞，提早或推迟关闭活塞 C_2 ，都将影响实验要求，引入误差。由于数字电压表尚有滞后显示，用计算机实时测量可以发现此放气时间仅约零点几秒，并与放气声音的产生与消失很一致，所以关闭活塞 C_2 用听声的方法更可靠些。
6. 实验要求环境温度基本不变，如发生环境温度不断下降情况，可在远离实验仪适当加温，以保

证实验正常进行。

7. 请不要靠近窗口，太阳光照射较强处做实验，以免影响实验进行。
8. 密封装配后必须等胶水变干且不漏气，方可做实验；
9. 打气球橡胶管插入前可先沾水(或肥皂水)，然后轻轻推入二通，以防止断裂；
10. 若采用外接法，外接电池可采用四节甲电池串联作为 6V 直流电源；
11. 在充、放气后要让气体回到室温需要较长时间，且需要保证此过程中室温不发生变化。大量的实验数据显示，当温度变化趋于停止时，温度已经非常接近初温，此时可认为气体已处于平衡状态，由此引起的误差对实验结果的贡献不大。

12. 附录：关于空气比热（II 型）内接电源的使用说明

13. 利用 AD590 温度传感器测温时可以利用机箱内部的现成电路，我们把它称为内接法；也可以由学生自己动手练习接 AD590 温度传感器测温电路，我们把它称为外接法。我公司根据这两种要求生产了一批内接标准 5K 测量电阻和 6V 基准稳压源及外接 6V 甲电池和电阻箱。两种方法的测量原理图见图 3、图 4。

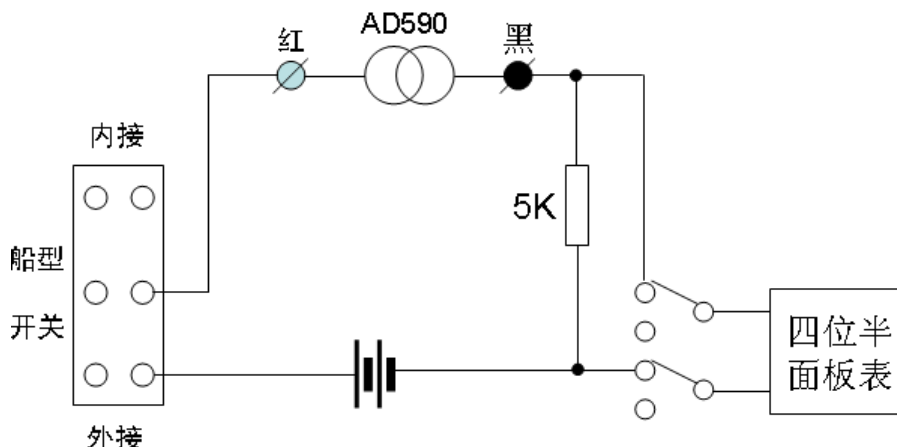


图 5 外接法

外接法：如果实验需要改变测量电阻，则把机箱后面的船型开关接向外这一边，在外面把甲电池、测量电阻、AD590 串联起来，把测量电阻二端分别接在面板的红、黑输入端即可进行测量。

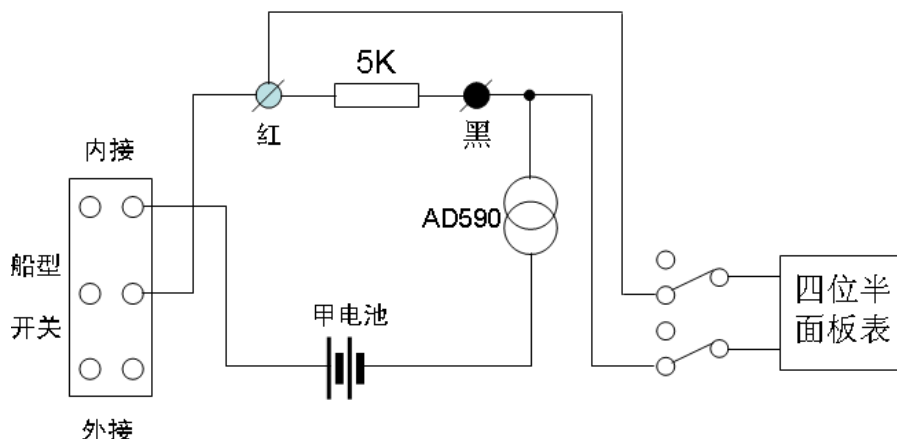


图 6 内接法

内接法：使用时如果采用内接电阻和电源，则把机箱后面的船型开关接向内这一边即可。这时把 AD590 输出端的红、黑分别接在面板的红、黑输入端，即可进行测量。

实验三： 杨氏模量测定

一、实验目的

- 1、掌握钢丝的杨氏弹性模量测试方法
- 2、学习光杠杆放大测量方法

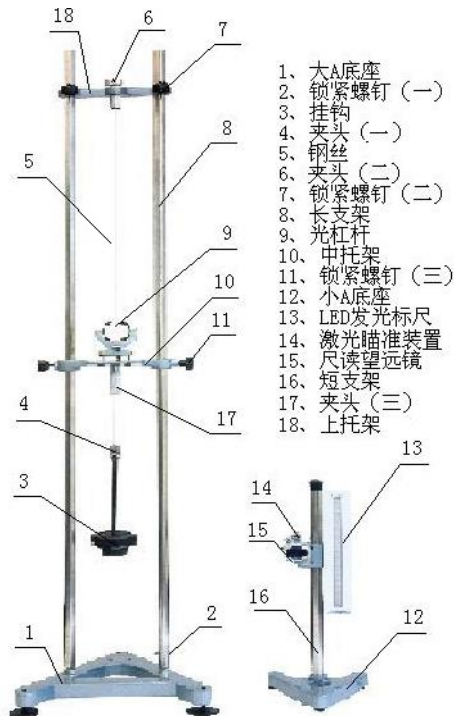


图1 KF-YMC 杨氏模量测定仪示意图

二、 实验仪器

KF-YMC 杨氏模量测定仪。

三、 实验原理

1. 杨氏模量的物理概念

杨氏模量(Young's modulus)是材料力学中的物理名词，是工程技术设计中广泛应用的参数。它仅取决于材料本身的物理性质，表征了材料的刚性特性，杨氏模量越大，说明材料越不容易发生

形变。

固体在外力作用下将发生形变，如果外力撤去后相应的形变消失，这种形变称为弹性形变。如果撤去外力后仍有残余形变，这种形变称为范性形变。

应力(σ): 单位面积上所受到的力(F/S)。

应变(ε): 是指在外力作用下的相对形变(相对伸长 $\Delta L/L$)，它反映了物体形变的大小。

在物体的弹性限度内，应力与应变成正比，其比例系数称为杨氏模量(记为 Y)。用公式表达为:

$$Y = \sigma / \varepsilon = (F \cdot L) / (S \cdot \Delta L)$$

Y 在数值上等于产生单位应变时的应力，它的单位与应力的单位相同。杨氏模量表征了材料的属性，与外力及物体的形状无关。杨氏模量越大 说明在压缩或拉伸材料时，材料的形变越小。

2. 测量原理

测量杨氏模量的方法一般有拉伸法、梁弯曲法、振动法、内耗法等，还有利用光纤位移传感器、莫尔条纹、电涡流传感器和波动 (微波或超声波) 传导共振等实验技术测量杨氏模量的方法等等。本实验是用拉伸法来测量杨氏模量。

杨氏模量测定仪是利用光杠杆对金属丝长度的微小形变进行测量的原理，对材料的杨氏模量进行测定的物理实验设备。

柱状体受外力作用时的形变量 ΔL ，柱状体的长度 L，截面积 S，作用力 F，满足虎克定律:

$$\frac{F}{S} = Y \frac{\Delta L}{L} \quad (1)$$

式中 Y 称为杨氏弹性模量，其单位为 N/m^2 ，是表征材料抗应变能力的一个固定参量，由材料的材质决定，与其几何形状无关。

由于一般 ΔL 很小，常采用光杠杆放大法进行测量，图一为其原理图。

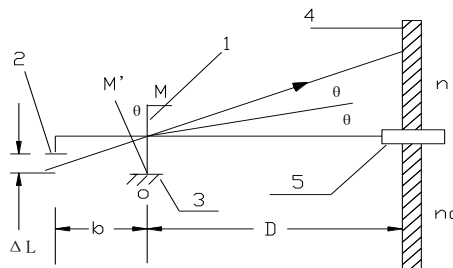


图 2

- 1、反射镜 2、与钢丝相连的夹套组件 I 3、中托板 4、标尺 5、望远镜

初始时，镜面 M 的法线正好是水平的，假设是理想状态， n_0 是反射镜 M 的法线。当金属丝伸长 ΔL ，光杠杆镜架后尖脚随金属丝下落 ΔL ，带动 M 转一 θ 角，镜面至 M'，法线也转过一角度。根据光的反射定律， on_0 和 on 的夹角为 2θ 。

如果反射镜面到标尺的距离为 D，后尖脚到前两脚间连线的垂直距离为 b，则有：

$$\tan \theta = \frac{\Delta L}{b} \quad \tan 2\theta = \frac{n - n_0}{D}$$

由于 θ 很小，所以有：

$$\theta \approx \frac{\Delta L}{b} \quad 2\theta \approx \frac{n - n_0}{D}$$

消去 θ ，得

$$\Delta L = \frac{(n - n_0)b}{2D} = \frac{b}{2D} \Delta n \quad (2)$$

式中， $n - n_0 = \Delta n$ 。

由于伸长量 ΔL 是难测的微小长度，但当取 D 远大于 b 后，经光杠杆转换后的量 Δn 却是较大的量， $2D/b$ 决定了光杠杆的放大倍数。这就是光杠杆的放大原理，它已被应用在很多精密测量仪器中。

将式 (2) 代入式 (1) 得：

$$Y = \frac{FL}{S\Delta L} = \frac{8FLD}{\pi d^2 b} \frac{1}{\Delta n} \quad (3)$$

本实验使钢丝伸长的力 F 是砝码作用在钢丝上的重力 mg，因此，杨氏弹性模量的测量公式为

$$Y = \frac{8mgLD}{\pi d^2 b} \frac{1}{\Delta n} \quad (4)$$

式中， Δn 与 m 有对应关系，如果 m 是 1 个砝码的质量， Δn 应是荷重增（或减）1 个砝码所引起的光标偏移量；如果 Δn 是荷重增（或减）4 个砝码所引起的光标偏移量，m 就应是 4 个砝码的质量。

四、 实验内容

1、实验步骤

- a) 实验中一般为二人合作完成，其中一人（下文中称甲）负责调节反射镜和增减砝码，另一人（下文中称乙）负责调节望远镜并读数，然后互换。
- b) 调节升降螺钉，使激光通过光杠杆反射回来的光斑照到照明标尺的刻度线上。
- c) 乙目测望远镜与反射镜是否水平，并根据需要要求甲调节反射镜的俯仰；乙通过望

远镜同时调节调焦旋钮，找到标尺像，此过程中可适当移动尺读望远镜部件的位置，以使找像迅速准确，要求看到的标尺像大致在红黑相间部位，如不在可适当调节标尺的位置，或望远镜在立杆上的位置。

d) 由甲逐次增加砝码，乙记录相应的读数 n_i ，一为 8 次；然后再逐个取下，并记录相应的读数 n_i' 。

e) 增减砝码时，动作要轻柔，以免造成钢丝剧烈晃动影响读数。

f) 计算出同一负荷下标尺的读数平均值 \bar{n}_i ，用逐差法求出在增减四个砝码时钢丝的平均偏移量 Δn 。

g) 用卷尺（自备）测取夹紧部件 I、II 之间（必须是夹紧点起计）的钢丝长度 L 和反射镜至标尺的距离 D 。

h) 用短尺（自备）量取光杠杆短臂尖脚至组件 9 的两个尖脚连线的垂直距离 b 。

i) 用千分尺（自备）测取钢丝直径 d ，由于钢丝直径可能不均匀，应在上、中、下各部位进行测量，每位置在相互垂直的方向各测一次（要求不高时可免）。

2、数据处理

测量钢丝的微小伸长量，记录表如下：

序号 i	砝码质量 m/kg	光标示值 n_i/cm			光标偏移量 $\Delta n = n_{i+4} - n_i / \text{cm}$	偏差 $ \delta(\Delta n) $
		增荷时	减荷时	平均值		
					$\bar{\Delta n} =$	$\bar{\delta(\Delta n)} =$

钢丝微小伸长量的放大量的测量结果为

$$\Delta n = (\quad \pm \quad) \text{ cm}$$

2、测量钢丝直径记录表 $d_0 =$ _____ mm;

测量部位	上部	中部	下部	平均值

测量方向	纵向	横向	纵向	横向	纵向	横向	
D/mm							

3、依次测 L、D、b 值：

$$L = (\quad \pm \quad) \text{ m}$$

$$D = (\quad \pm \quad) \text{ m}$$

$$b = (\quad \pm \quad) \text{ m}$$

1、代入公式，计量出钢丝的杨氏弹性模量，如有计算不确定度要求，请按相关要求计算。

五、 注意事项

a) 利用激光调节望远镜、反射镜，使视场中刻度尺清晰可读，正式读数前，要关闭激光，避免长时间照射损伤视力。

b) 望远镜的调焦旋钮调节时应轻柔，尤其是在两端感觉已被限位时，不能用力，否则易损坏；不用时应用镜罩遮挡物镜、目镜，或用袋形物套住望远镜。

c) 仪器要放在干燥通风、无腐蚀性气体的室内，并防止突然撞击与强烈振动。

d) 反射镜上有灰尘、污迹时，用擦镜纸擦去，切勿用手指、粗布擦，以免镜面起毛，影响观察和读数的准确。

e) 调试仪器时，切记要用手托住移动部分，然后旋松锁紧手轮，以免相互撞击。

f) 各手轮及可动部分如发生阻滞不灵现象时，应立即检查原因，切勿强扭，以防损坏仪器结构或机件。

实验四：声速测定实验

一、实验背景

声波是一种在弹性媒质中传播的机械波。声波在媒质中传播时，声速，声衰减等诸多参量都和媒质的特性与状态有关，通过测量这些声学量可以探知媒质的特性及状态变化。例如，通过测量声速可求出固体的弹性模量；气体、液体的比重、成分等参量。

在自由空间同一媒质中，声速一般与频率无关，例如在空气中，频率从 20 赫兹变化到 8 万赫兹，声速变化不到万分之二。由于超声波长短，易于定向发射，不会造成听觉污染等优点，我们通过测量超声波的速度来确定声速。超声波在医学诊断，无损检测，测距等方面都有广泛应用。

二、实验目的

1. 了解超声换能器的工作原理和功能
2. 学习共振干涉法、相位比较法以及时差法测定声速的原理和技术
3. 熟悉测量仪和示波器的调节使用
4. 测定声波在空气中的传播速度
5. 测定声波在水中的传播速度
6. 测定声波在固体中的传播速度

三、实验原理

1. 压电陶瓷换能器

压电材料受到与极化方向一致的应力 F 时，在极化方向上会产生一定的电场 E ，它们满足线性关系：

$$E = g \cdot F$$

反之，当在压电材料的极化方向上加电压 E 时，材料的伸缩形变 S 与电压 E 也呈线性关系：

$$S = a \cdot E$$

系数 g 、 a 称为压电常数，它与材料性质有关。本实验采用压电陶瓷超声换能器，将实验仪输出的正弦振荡电信号转换成超声振动。压电陶瓷片是换能器的工作物质，它是用多晶体结构的压电材料(如钛酸钡，锆钛酸铅等)在一定的温度下经极化处理制成的。在压电陶瓷片的前后表面粘贴上两块金属，组成的夹心型振子，就构成了换能器。由于振子是以纵向长度的伸缩，直接带动头部金属作同样纵向长度伸缩，这样所发射的声波，方向性强，平面性好。每一只换能器都有其固有的谐振频率，换能器只有在其谐振频率上，才能有效的发射(或接收)。本实验中 使用一个换能器作为发射器，另一个作为接收器，二换能器的表面互相平行，且谐振频率匹配。

2. 声速的测量方法

声速的测试方法可以分为两类。第一类方法是直接根据速度关系式：

$$v=S/t$$

测出传播距离 S 和所需时间 t 后即可算出声速，该法称为“时差法”，这是工程应用中常用的方法。第二类方法是利用波长频率关系式：

$$v=f \cdot \lambda$$

测量出频率 f 和波长 λ 来计算出声速，测量波长时又可用“共振干涉法”或“相位比较法”，本实验可用上述三种方法测量气体、液体以及固体中的声速。

a. 共振干涉(驻波)法测声速

到达接收器的声波，一部分被接收并在接收器电极上有电压输出，一部分经原路反射回发射端。由波的干涉理论可知，两列反向传播的同频率波干涉将形成驻波，驻波中振幅最大的点称为波腹，振幅最小的点称为波节，任何两个相邻波腹(或两个相邻波节)之间的距离都等于半个波长。因此改变两只换能器间的距离，同时用示波器监测接收器上的输出电压幅度变化，可观察到电压幅度随距离周期性的变化。记录下相邻两次出现最大电压数值时换能器间距离读数。两读数之差的绝对值应等于声波波长的二分之一，见图 1。已知声波频率并测出波长，即可计算声速。实际测量中为提高测量精度，可连续多次测量并用逐差法处理数据。

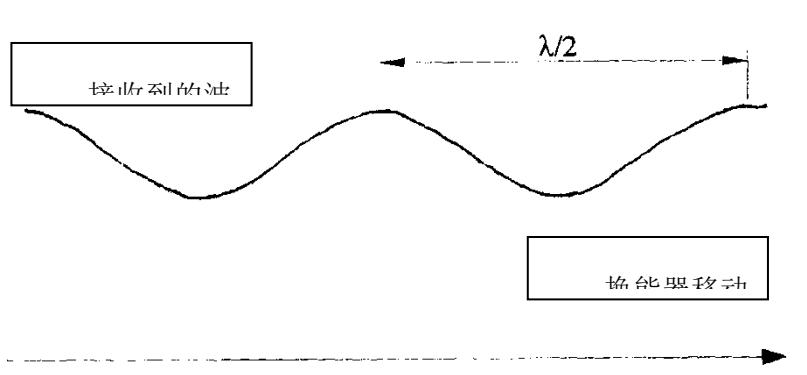


图 1 共振干涉(驻波)法测试声速

b. 相位比较(行波)法测声速

当发射器与接收器之间距离为 L 时，在发射器驱动正弦信号与接收器接收到的正弦信号之间将有相位差为：

$$\Phi=2 \pi L/ \lambda =2 \pi n+ \Delta \Phi$$

若将发射器驱动正弦信号与接收器接收到的正弦信号分别接到示波器的 X 及 Y 输入端，则相互垂直的同频率正弦波干涉，其合成轨迹称为李萨如图，如图 2 所示。

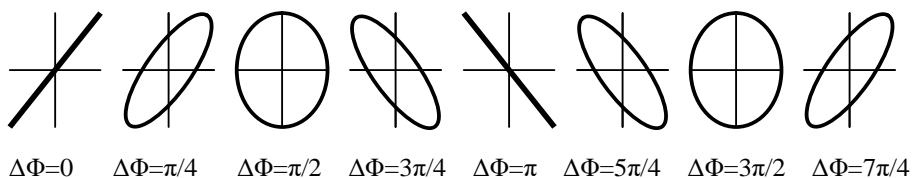


图 2 相位比较法的李萨如图形

当接收器和发射器的距离变化等于一个波长时，则发射与接收信号之间的相位差也正好变化一个周期(即 $\Delta \Phi = 2\pi$)，相同的图形就会出现。反之，当准确观测相位差变化一个周期时接收器移动的距离，即可得出声波的波长 λ ，再根据声波的频率，即可求出声波的传播速度。

c. 时差法测量声速

若以**脉冲**调制正弦信号输入到发射器，使其发出脉冲声波，经时间 t 后到达距离 L 处的接收器。接收器接收到脉冲信号后，能量逐渐积累，振幅逐渐加大，脉冲信号过后，接收器作衰减振荡，如图 3 所示。 t 可由测量仪自动测量，也可从示波器上读出。实验者测出 L 后，即可由 $v=L/t$ 计算出声速。

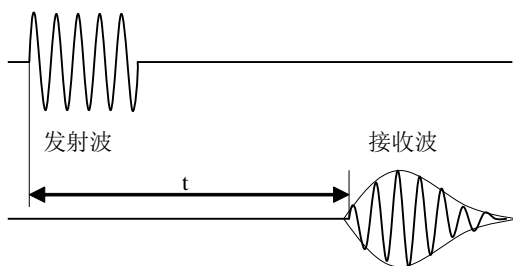


图 3 时差法测量声速

四、实验仪器

ZKY—SS 声速测定实验仪是为测量在空气、液体以及固体中声波传播速度而设计的专用仪器。仪器可用于大学基础物理实验，是振动与波、压电陶瓷应用、示波器应用和声纳技术应用的一个好实验。测试仪不但覆盖了基础物理声速实验中常用的二种测试方法，还可以用工程中实际使用的声速测量方法-时差法进行测量。

实验仪由超声实验装置（换能器及移动支架组合）和声速测定信号源主机组成；另有水槽（选购件）和固体试验样品（选购件）。

1. 声速测定信号源

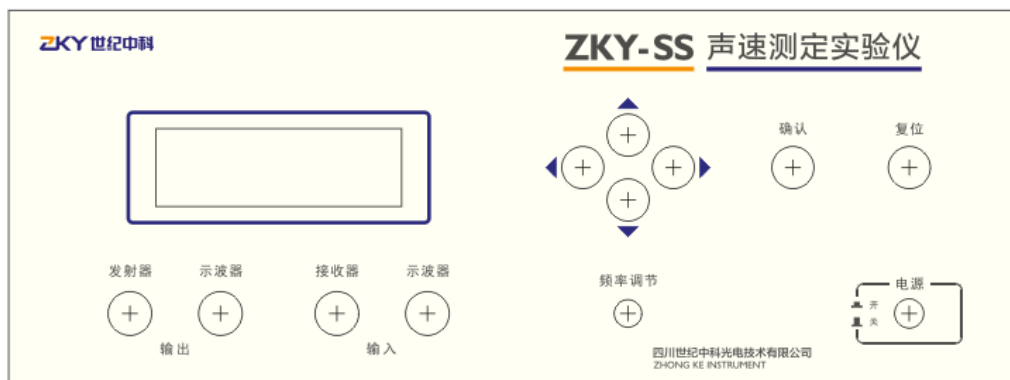


图 4 声速测定信号源

声速测定信号源面板见图 4，上有一块 LCD 显示屏用于显示信号源的工作信息；还具有上下、左右按键，确认按键、复位按键、频率调节旋钮和电源开关。上下按键用作光标的上下移动选择，左右按键用作数字的改变选择，确认按键用作功能选择的确认以及工作模式选择界面与具体工作模式界面的交替切换。

同时还有超声发射驱动信号输出端口（简称 TR, 连接到超声波发射换能器）、超声发射监测信号输出端口（简称 MT, 连接到示波器显示通道 CH1）、超声接收信号输入端口（简称 RE, 连接到超声波接收换能器）、超声接收信号监测输出端口（简称 MR, 连接到示波器显示通道 CH2）。

声速测定信号源具有选择、调节、输出超声发射器驱动信号；接收、处理超声接收器信号；显示相关参数；提供发射监测和接收监测端口连接到示波器等其它仪器等功能。

开机显示欢迎界面后，自动进入按键说明界面。按确认键后进入工作模式选择界面，可选择驱动信号为连续正弦波工作模式（共振干涉法与相位比较法）或脉冲波工作模式（时差法）。

选择连续波工作模式，按确认键后进入频率与增益调节界面；在该界面下将显示输出频率值；发射增益档位，接收增益档位等信息，并可作相应的改动。

选择脉冲波工作模式，按确认键后进入时差显示与增益调节界面；在该界面下将显示超声波通过目前超声波换能器之间的距离所需的时间值；发射增益档位，接收增益档位等信息，并可作相应的改动。

用频率调节旋钮调节频率，在连续波工作模式下显示屏将显示当前输出驱动信号的频率值。

增益可在 0 档到 3 档之间调节，初始值为 2 档；发射增益调节驱动信号的振幅；接收增益将调节接收信号放大器的增益，放大后的接收信号由接收监测端口输出。以上调节完成后就可进行测量了。

改变测量条件可按确认键，将交替显示模式选择界面或频率（时差显示）与增益调节界面。按复位键将返回欢迎界面。

该信号源主要技术参数如下：

- a. 连续波频率范围 30kHz — 45kHz；分辨率 1Hz；5 位数字显示。
- b. 脉冲调制信号源：载波信号频率范围同连续波频率范围；脉冲调制波宽度 16 个载波周期；脉冲调制波周期 16ms。
- c. 计时范围 0.1 μ s—10ms；分辨率 0.1 μ s；5 位数字显示。
- d. 激励输出电压：最大输出电压 15V_{pp}；最大输出功率 2W，四档可调。
- e. 接收信号放大器：四档可调，放大倍率为 1, 2, 5, 10。
- f. 抗电强度：50Hz 正弦波 500V 电压 1min 耐压试验
- g. 工作电压：交流 220V（ \pm 10%），最大工作电流 0.1A。
- h. 仪器外形尺寸：280mmX320mmX140mm。

2. 实验装置介绍

超声实验装置中发射器固定，摇动丝杆摇柄可使接收器前后移动，以改变发射器与接收器的距离。丝杆上方安装有数字游标尺（或机械游标尺），可准确测量位置。整个装置可方便的装入或拿出水槽。见图 5

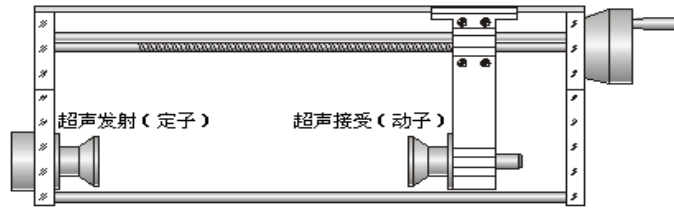


图 5 超声实验装置（换能器及移动支架组合）

该装置主要技术参数如下：

- a. 配对压电陶瓷换能器：谐振频率 $37 \pm 2\text{kHz}$ ；可承受的连续电功率不小于 10W。
- b. 两换能器之间测试距离：50—250mm
- c. 外形：测试架外形尺寸 500mmX100mmX170mm

3. 选购件：有水槽和固体试验样品

3.1 水槽：外形尺寸： 445mmX135mmX95mm， 容积： 429mmX119mmX79mm
3.2 固体试样：一套三件： 10cm , 15cm, 20cm 各一件

五、实验内容

1. 声速测定仪系统的连接与工作频率调节

- a. 连接装配。超声实验装置和声速测定仪信号源及双踪示波器之间的连接如下图 6：

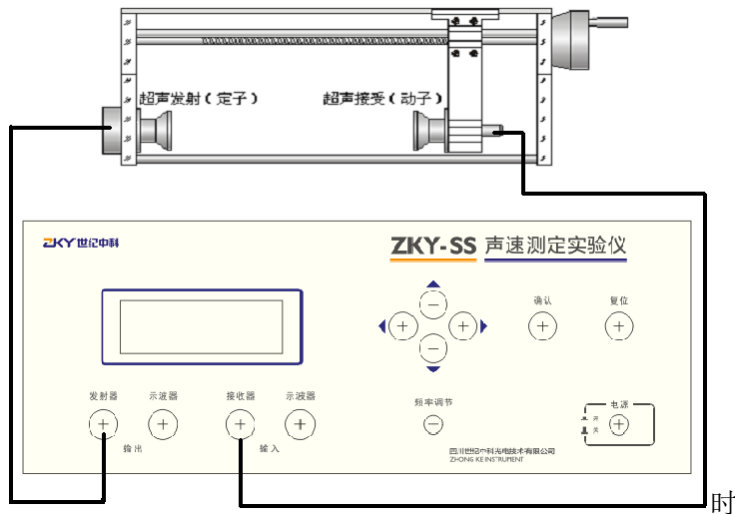


图 6 仪器连线说明

其中输出端发射器 TR 接实验装置超声发射（定子），相应示波器接口 MT 接示波器 CH1 通道，用于观察发射波形；输入端接收器器 RE 接实验装置超声接收（动子）相应示波器接口 MR 接示波器 CH2 通道，用于观察接收波形。

- b. 在接通市电开机后，显示欢迎界面后，自动进入按键说明界面。按确认键后进入工作模式选择界面，可选择驱动信号为连续正弦波工作模式（共振干涉法与相位比较法）或脉冲波工作模式（时差法）；在工作模式选择界面中选择驱动信号为连续正弦波工作模式，在连续正弦波工作模式中使信号源工作预热 15 分钟。

c. 调节驱动信号频率到压电陶瓷换能器系统的最佳工作点

只有当发射换能器的发射面与接收换能器的接收面保持平行时才有较好的系统工作效果。为了得到较清晰的接收波形，**必须将外加的驱动信号频率调节到发射换能器的谐振频率点处时，才能较好的进行声能与电能的相互转换，以得到较好的实验效果。**

按照调节到压电陶瓷换能器谐振点处的信号频率估计一下示波器的扫描时基并进行调节，使在示波器上获得稳定波形。以目前使用的换能器的标称工作频率而言，时基选择在 5-20us/div 会有较好的显示效果。

超声换能器工作状态的调节方法如下：在仪器预热 15 分钟并正常工作以后，首先将接收端大致调整到标尺中间位置，然后调节声速测定仪信号源输出电压(10—15Vpp 之间)，调整信号频率(在 30--45kHz)，使接收端接收到的信号幅值最大；然后频率不变，在该位置左右微调接收端位置，接收到的信号幅值最大；最后保证接收端位置不变，微调频率，接收到的信号幅值最大。此时该频率即可作为压电陶瓷换能器系统的最佳工作频率点。

2. 用共振干涉法测量空气中的声速

按步骤 1. 的要求完成系统连接与调谐，并保持在实验过程中不改变调谐频率。

将示波器设定在扫描工作状态，扫描速度约为 10us / 格，信号输入通道输入调节旋钮约为 1V / 格（根据实际情况有所不同），并将发射监测输出信号输入端设为触发信号端。

信号源选择连续波(Sine-Wave)模式，建议设定发射增益为 2 档、接收增益为 2 档，或根据实际波形增减增益。

摇动超声实验装置丝杆摇柄，在发射器与接收器距离为 5 厘米附近处，找到共振位置(振幅最大)，作为第 1 个测量点并记录读数。摇动摇柄使接收器远离发射器，每到共振位置均记录位置读数，共记录 10 组数据于表 1

共振干涉法测量空气中的声速 谐振频率 $f_0 =$ _____ kHz 温度 $T =$ _____ °C

测量次数 i	1	2	3	4	5	$\lambda_{\text{平均}}$
位置 L_i (mm)						
测量次数 i	6	7	8	9	10	
位置 L_i (mm)						
波长 λ_i (mm)						

表 1 共振干涉法测量空气中的声速

接收器移动过程中若接收信号振幅变动较大影响测量，可调节示波器的通道增益旋钮，使波形显示大小合理。

3. 用相位比较法测量空气中的声速

按步骤 1. 的要求完成系统连接与调谐，并保持在实验过程中不改变调谐频率。

信号源选择连续波(Sine-Wave)模式，建议设定发射增益为 2 档、接收增益为 2 档，或根据实际波形增减增益。

将示波器在设定 X-Y 工作状态。将信号源的发射监测输出信号接到示波器的 X 输入端，并设为触发信号，接收监测输出信号接到示波器的 Y 输入端，信号输入通道输入调节旋钮约为 1V / 格（根据实际情况有所不同）。

在发射器与接收器距离为 5 厘米附近处，找到 $\Delta \Phi = 0$ 的点，作为第 1 个测量点，并记录读数。摇动摇柄使接收器远离发射器，每到 $\Delta \Phi = 0$ 时均记录读数，共记录 10 组数据于表 2 中。

相位比较法测量空气中的声速 谐振频率 $f_0 =$ _____ kHz 温度 $T =$ _____ °C

测量次数 i	1	2	3	4	5	λ 平均
位置 L_i (mm)						
测量次数 i	6	7	8	9	10	
位置 L_i (mm)						
波长 λ_i (mm)						

表 2 相位比较法测量空气中的声速

接收器移动过程中若接收信号振幅变动较大影响测量，可调节示波器 Y 通道增益旋钮，使波形显示大小合理。

4. 用相位比较法测量水中的声速

测量水中的声速时，将实验装置整体放入水槽中，槽中的水高于换能器顶部 1—2 厘米。按步骤 1. 的要求完成系统连接与调谐，并保持在实验过程中不改变调谐频率。

信号源选择连续波 (Sine-Wave) 模式，设定发射增益为 0，接收增益调节为 0 档。将示波器在设定 X-Y 工作状态。将信号源的发射监测输出信号接到示波器的 X 输入端，并设为触发信号，接收监测输出信号接到示波器的 Y 输入端，信号输入通道输入调节旋钮约为 1V / 格（根据实际情况有所不同）。

在发射器与接收器距离为 3 厘米附近处，找到 $\Delta \Phi = 0$ （或 π ）的点，作为第 1 个测量点，并记录读数。摇动摇柄使接收器远离发射器，每到 $\Delta \Phi = 0$ 时均记录读数。

接收器移动过程中若接收信号振幅变动较大影响测量，可调节示波器 Y 衰减旋钮。由于水中声波长约为空气中的 5 倍，为缩短行程，可在 $\Delta \Phi = 0, \pi$ 处均进行测量，并记录于表 3

相位比较法测量水中的声速 谐振频率 $f_0 =$ _____ kHz 温度 $T =$ _____ °C

测量次数 i	1	2	3	4	5	λ 平均
位置 L_i (mm)						
测量次数 i	6	7	8	9	10	
位置 L_i (mm)						
波长 λ_i (mm)						

表 3 相位比较法测量水中的声速

5. 用时差法测量水中的声速

按步骤 1. 的要求完成系统连接与调谐，并保持在实验过程中不改变调谐频率。

信号源选择脉冲波工作模式，设定发射增益为 2，接收增益调节为 2 档。将发射器与接收器距离为 3 厘米附近处，作为第 1 个测量点，记录读数与时差。摇动摇柄使接收器远离发射器，每隔 20 毫米记录位置与时差读数，共记录 10 点于表 4 中。

时差法测量水中的声速 谐振频率 $f_0 =$ _____ kHz 温度 $T =$ _____ °C

测量次数 i	1	2	3	4	5	V 平均
位置 L_i (mm)						
时刻 t_i (us)						
测量次数 i	6	7	8	9	10	
位置 L_i (mm)						
时刻 t_i (us)						
速度 V_i (m/s)						

表 4 时差法测量水中的声速

也可以用示波器观察输出与输入波形的相对关系。将示波器在设定扫描工作状态，扫描速度约为 0.2ms / 格，发射信号输入通道调节为 1v / 格，并设为触发信号，接收信号输入通道调节为 0.1v / 格（根据实际情况有所不同）。

6. 用时差法测量固体中的声速

由于被测固体样品的长度不能连续变化，因此只能采用时差法进行测量。为了增强测量的可靠性，**在换能器端面及被测固体的端面上涂上声波耦合剂，建议采用医用超声耦合剂。**测量方法可参考步骤 5. 中用时差法测量水中的声速。

六、注意事项

1. 维护保养：

- a. 仪器不使用时，应存放空气温度在 0~35℃的室内架子上；架子离地高度大于 100mm；
 - b. 每次使用完毕后，用干燥清洁的抹布将测试架及螺杆清洗干净；
 - c. 仪器应在清洁干净的场所使用，避免阳光直接暴晒和剧烈颠簸；
 - d. ZKY-SS 型超声实验装置测试机架为有机玻璃制作，使用时应谨慎，以防止发生意外；
 - e. 使用时，应避免声速测试仪信号源的信号输出端短路；
 - f. ZKY-SS 型声速测定实验仪的保修期为一年。
2. 在水中共振法测量声速的效果较差，接收波形的幅度变化不明显，根据对实验数据分析，我们认为这是由于水介质与接收头对声波的特性阻抗相接近，反射信号弱，从而导致了驻波现象的不明显。故无法做水介质中共振干涉法测量声速的实验。
 3. 在空气中建议使用共振干涉法和相位比较法测量声速，水中建议使用相位比较法，时差法测量声速，固体中只能使用时差法测量声速。
 4. 发射、接受增益的大小应在监测信号不失真的原则下设定。

附录 1：时差法仪器误差及数据处理（建议用最大增益测试）

在使用时差法进行声速测试时，需要考虑信号间的时间差。而实际在仪器测试时，会存在 4 个信号，具体见下图 7：

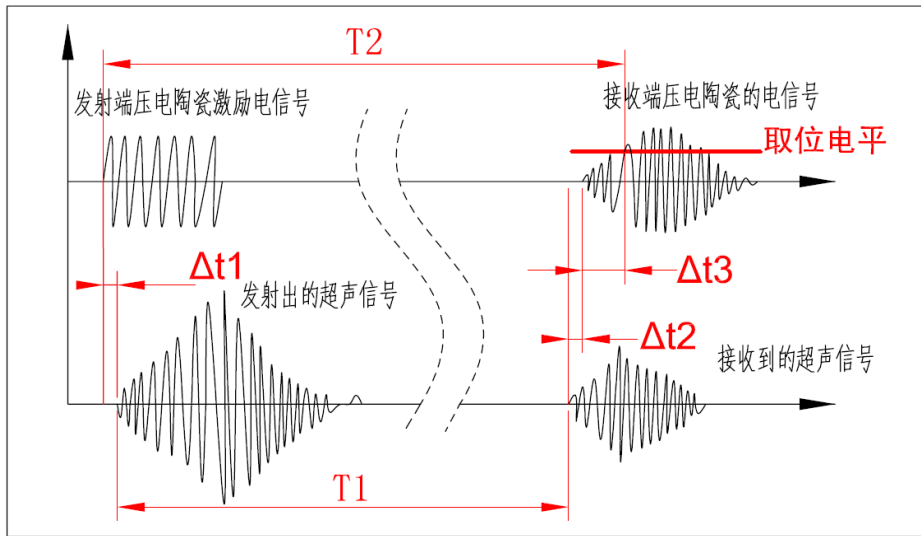
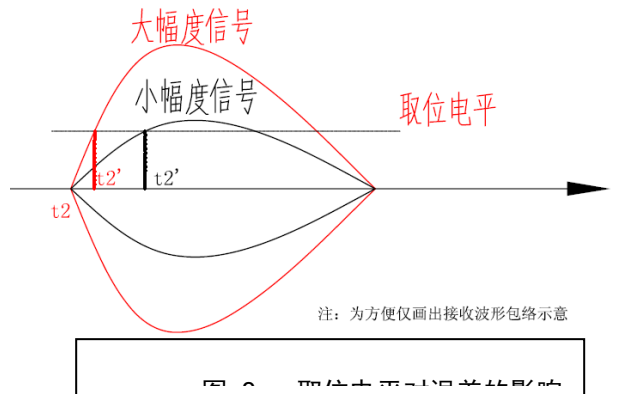


图 7 时差发测试中的信号波形

理论上，我们需要测试的时间差是 T_1 ，但是实际的单次测量中测试量为 T_2 ，这将存在两个误差来源：

1. 电信号和声信号的转换，是通过压电陶瓷的振动实现的，由于机械振动的时间滞后，会带来图中的 Δt_1 和 Δt_2 的时间误差。当介质不变，且信号幅度变化不大时，可以将 Δt_1 和 Δt_2 看做常数，在使用逐差法时，可以通过做减法，将该部分误差消除。
2. Δt_3 ，主要是“取位电平”无法做到极小导致的。取位电平作用是：因接收到的超声信号存在杂波等干扰波，在对信号进行相关处理后，以该电平幅度为接收信号的接收出发点。假设图 8 中两个接收信号，除去幅度外其他完全一致，可见幅度大的信号测试的 t_2' 更靠近理想值 t_2 ，因此可以说接收信号的幅度将影响时间测试的准确性。在仪器测试中影响接收信号幅度的变量总结如下：

- a. 发射/接收增益的大小(因此建议时差法使用最大增益进行时差测试)；
- b. 测试距离的变化：一般而言随距离的增大，接收信号幅度会出现衰减；
- c. 介质的类型：不同的介质有不同的衰减系数，同时不同介质与传感器金属界面上存在不同的反射/透射系数；
- d. 传感器与测试样件的耦合程度。在本仪器中这主要体现在固体中时差法的测量，需要使用超声耦合剂，目的是减少空隙间的少量空气影响使超声穿透，以及减小探头与样件间的阻抗差，从而减小超声能量在此界面的反射损失。



同样的原因， Δt_3 的误差可以通过逐差法减小，但是由于影响因素较多，是无法完全消除的。

值得说明的是实际的应用中，时差法的使用条件一般满足测试间距 $L \gg \lambda$ (超声波长)，这样 T_2 是远大于 $(\Delta t_1 + \Delta t_2 + \Delta t_3)$ 的，因此误差基本可以忽略不计，间距时间关系可以直接使用 $s=vt$ (不使用逐差法)，但在我们的仪器中由于测试距离较小，因此请用户使用过程中，根据情况进行误差分析，同时采用合适的数据处理方法。

附录 2：数据记录与逐差法处理实例

表 1 共振干涉法测量空气中的声速 谐振频率 $f_0=37.071\text{kHz}$ 温度 $T=10^\circ\text{C}$

测量次数 i	1	2	3	4	5	$\lambda_{\text{平均}}$
位置 L_i (mm)	0	4.65	9.21	13.76	18.40	
测量次数 i	6	7	8	9	10	
位置 L_i (mm)	22.98	27.60	32.17	36.80	41.38	
波长 λ_i (mm)	9.192	9.18	9.184	9.216	9.192	

数据处理计算公式： $V_{\text{理论}}=331.45+0.59T$ $V_{\text{实验}}=f_0 * \lambda_{\text{平均}}$
 $\lambda_i = 2*(L_{i+5}-L_i)/5$ $\lambda_{\text{平均}}=(\lambda_1+\lambda_2+\lambda_3+\lambda_4+\lambda_5)/5$
 误差 $E=(V_{\text{实验}}-V_{\text{理论}})/V_{\text{理论}}$

实验结论： $V_{\text{实验}}=340.786$ (m/s) $V_{\text{理论}}=337.35$ (m/s) 误差 $E=1.02\%$

表 2 相位比较法测量空气中的声速 谐振频率 $f_0=37.109\text{kHz}$ 温度 $T=10^\circ\text{C}$

测量次数 i	1	2	3	4	5	$\lambda_{\text{平均}}$
位置 L_i (mm)	0	9.20	18.53	27.72	36.88	
测量次数 i	6	7	8	9	10	
位置 L_i (mm)	46.22	55.74	64.98	73.88	83.24	
波长 λ_i (mm)	9.244	9.308	9.29	9.232	9.272	

数据处理计算公式： $V_{\text{理论}}=331.45+0.59T$ $V_{\text{实验}}=f_0 * \lambda_{\text{平均}}$
 $\lambda_i = (L_{i+5}-L_i)/5$ $\lambda_{\text{平均}}=(\lambda_1+\lambda_2+\lambda_3+\lambda_4+\lambda_5)/5$
 误差 $E=(V_{\text{实验}}-V_{\text{理论}})/V_{\text{理论}}$

实验结论： $V_{\text{实验}}=343.97$ (m/s) $V_{\text{理论}}=337.35$ (m/s) 误差 $E=1.96\%$

表 3 相位比较法测量水中的声速 谐振频率 $f_0=35.866\text{kHz}$ 温度 $T=10^\circ\text{C}$

测量次数 i	1	2	3	4	5	$\lambda_{\text{平均}}$
位置 L_i (mm)	0	20.06	40.34	63.97	86.49	
测量次数 i	6	7	8	9	10	
位置 L_i (mm)	106.93	125.98	143.03	161.35	184.56	
波长 λ_i (mm)	42.772	42.368	41.076	38.952	39.228	

数据处理计算公式： $\lambda_i = 2*(L_{i+5}-L_i)/5$ $\lambda_{\text{平均}}=(\lambda_1+\lambda_2+\lambda_3+\lambda_4+\lambda_5)/5$
 $V_{\text{实验}}=f_0 * \lambda_{\text{平均}}$

实验结论： $V_{\text{实验}}=1466.2$ (m/s)

表 4 时差法测量水中的声速 温度 $T=10^\circ\text{C}$

测量次数 i	1	2	3	4	5	$V_{\text{平均}}$
位置 L_i (mm)	0	20	40	60	80	
时刻 t_i (us)	132	146	160	175	189	
测量次数 i	6	7	8	9	10	

位置 L_i (mm)	100	120	140	160	180	
时刻 t_i (us)	202	216	230	247	261	
速度 V_i (m/s)	1428.57	1428.57	1428.57	1388.89	1388.89	1412.7

数据处理计算公式: $V_i = (L_{i+5} - L_i) / (t_{i+5} - t_i)$ $V_{\text{平均}} = (V_1 + V_2 + V_3 + V_4 + V_5) / 5$

实验结论: $V_{\text{实验}} = 1412.7$ (m/s)

表 5 时差法测量固体中的声速 (医用超声耦合剂, 增益 3/3) 温度 $T=10^\circ\text{C}$

测量次数 i	1	2	3
固体样件长度 L_i /mm	100	150	200
时刻 T_i /us	86.4	108.4	131.5

数据处理计算公式: $V_{\text{实验}} = V_i = (L_{i+1} - L_i) / (t_{i+1} - t_i)$ $V_{\text{平均}} = (V_1 + V_2) / 2$

实验结论: $V_{\text{实验}} = 2123$ (m/s)

实验五：多普勒效应综合实验

一、实验背景

当波源和接收器之间有相对运动时，接收器接收到的波的频率与波源发出的频率不同的现象称为多普勒效应。多普勒效应在科学研究，工程技术，交通管理，医疗诊断等各方面都有十分广泛的应用。例如：原子，分子和离子由于热运动使其发射和吸收的光谱线变宽，称为多普勒增宽，在天体物理和受控热核聚变实验装置中，光谱线的多普勒增宽已成为一种分析恒星大气及等离子体物理状态的重要测量和诊断手段。基于多普勒效应原理的雷达系统已广泛应用于导弹，卫星，车辆等运动目标速度的监测。在医学上利用超声波的多普勒效应来检查人体内脏的活动情况，血液的流速等。电磁波（光波）与声波（超声波）的多普勒效应原理是一致的。本实验既可研究超声波的多普勒效应，又可利用多普勒效应将超声探头作为运动传感器，研究物体的运动状态。

二、实验目的

1. 测量超声接收器运动速度与接收频率之间的关系，验证多普勒效应，并由 $f-V$ 关系直线的斜率求声速。
2. 利用多普勒效应测量物体运动过程中多个时间点的速度，查看 $V-t$ 关系曲线，或调阅有关测量数据，即可得出物体在运动过程中的速度变化情况，可研究：
 - 1) 自由落体运动，并由 $V-t$ 关系直线的斜率求重力加速度。
 - 2) 简谐振动，可测量简谐振动的周期等参数，并与理论值比较。
 - 3) 匀加速直线运动，测量力、质量与加速度之间的关系，验证牛顿第二定律。
 - 4) 其它变速直线运动。

三、实验原理

a) 超声的多普勒效应

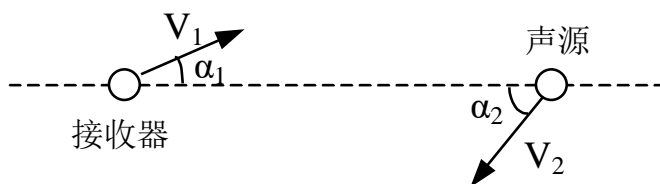


图 1 超声的多普勒效应示意图

根据声波的多普勒效应公式，当声源与接收器之间有相对运动时，接收器接收到的频率 f 为：

$$f = f_0 \cdot \frac{u + V_1 \cos \alpha_1}{u - V_2 \cos \alpha_2} \quad (1)$$

式中 f_0 为声源发射频率， u 为声速， V_1 为接收器运动速率， α_1 为声源与接收器连线与接收器运动方向之间的夹角， V_2 为声源运动速率， α_2 为声源与接收器连线与声源运动方向之间的夹角（如图 1）。

若声源保持不动，运动物体上的接收器沿声源与接收器连线方向以速度 V 运动，则从（1）式可得接收器接收到的频率应为：

$$f = f_0 \cdot \left(1 + \frac{V}{u}\right) \quad (2)$$

当接收器向着声源运动时， V 取正，反之取负。

若 f_0 保持不变，以光电门测量物体的运动速度，并由仪器对接收器接收到的频率自动计数，根据（2）式，作 f - V 关系图可直观验证多普勒效应，且由实验点作直线，其斜率应为 $k=f_0/u$ ，由此可计算出声速 $u=f_0/k$ 。

由（2）式可解出：

$$V = u \cdot \left(\frac{f}{f_0} - 1\right) \quad (3)$$

若已知声速 u 及声源频率 f_0 ，通过设置使仪器以某种时间间隔对接收器接收到的频率 f 采样计数，由微处理器按（3）式计算出接收器运动速度，由显示屏显示 V - t 关系图，或调阅有关测量数据，即可得出物体在运动过程中的速度变化情况，进而对物体运动状况及规律进行研究。

b) 超声的红外调制与接收

早期产品中，接收器接收的超声信号由导线接入实验仪进行处理。由于超声接收器安装在运动体上，导线的存在对运动状态有一定影响，导线的折断也给使用带来麻烦。新仪器对接收到的超声信号采用了无线的红外调制-发射-接收方式。即用超声接收器信号对红外波进行调制后发射，固定在运动导轨一端的红外接收端接收红外信号后，再将超声信号解调出来。由于红外发射/接收的过程中信号的传输是光速，远远大于声速，它引起的多普勒效应可忽略不计。采用此技术将实验中运动部分的导线去掉，使得测量更准确，操作更方便。信号的调制-发射-接收-解调，在信号的无线传输过程中是一种常用的技术。

四、 实验仪器

多普勒效应综合实验仪由实验仪，超声发射/接收器，红外发射/接收器，导轨，运动小车，支架，光电门，电磁铁，弹簧，滑轮，砝码及电机控制器等组成。实验仪内置微处

理器，带有液晶显示屏，图 2 为实验仪的面板图。

实验仪采用菜单式操作，显示屏显示菜单及操作提示，由 ▲ ▼ ◀ ▶ 键选择菜单或修改参数，

按“确认”键后仪器执行。可在“查询”页面，查询到在实验时已保存的实验的数据。操作者只须按每个实验的提示即可完成操作。



图 2 多普勒实验仪面板图

仪器面板上两个指示灯状态介绍

失锁警告指示灯：亮，表示频率失锁。即接收信号较弱（原因：超声接收器电量不足），

此时不能进行实验，须对超声接收器充电，让该指示灯灭；

灭，表示频率锁定。即接收信号能够满足实验要求，可以进行实验。

充电指示灯：灭，表示正在快速充电；

亮（绿色），表示正在涓流充电；

亮（黄色），表示已经充满；

亮（红色），表示已经充满或充电针未接触。

电机控制器功能介绍

1. 电机控制器可手动控制小车变换 5 种速度；
2. 手动控制小车“启动”，并自动控制小车倒回；
3. 5 只 LED 灯即可指示当前设定速度，又可根据指示灯状态反映当前电机控制器与小车之间出现的故障。

表 1 故障现象、原因及处理方法

故障现象	故障原因	处理方法
小车未能启动	小车尾部磁钢未处于电机控制器前端磁感应范围内	将小车移至电机控制器前端
	传送带未绷紧	调节电机控制器的位置使传送带绷紧
小车倒回后撞击电机控制器	传送带与滑轮之间有滑动	同上
5 只 LED 灯闪烁	电机控制器运转受阻（如：传送带安装过紧、外力阻碍小车运动），控制器进入保护状态	排除外在受阻因素，手动滑动小车到控制器位置，恢复正常使用

五、 实验内容

I. 验证多普勒效应并由测量数据计算声速

让小车以不同速度通过光电门，仪器自动记录小车通过光电门时的平均运动速度及与之对应的平均接收频率。由仪器显示的 f - V 关系图可看出速度与频率的关系，若测量点成直线，符合（2）式描述的规律，即直观验证了多普勒效应。用作图法或线性回归法计算 f - V 直线的斜率 k ，由 k 计算声速 u 并与声速的理论值比较，计算其百分误差。

1. 仪器安装

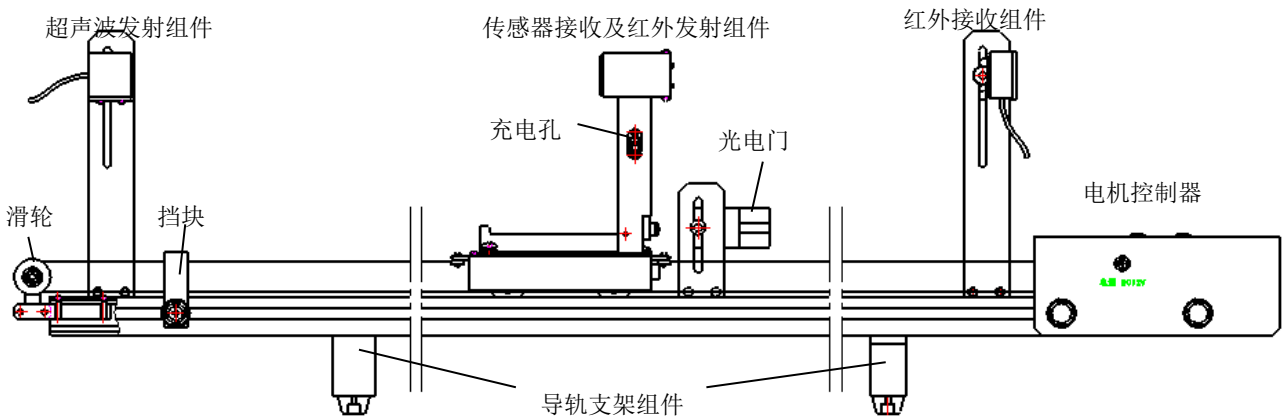


图3 实验装置示意图

如图3所示。所有需固定的附件均安装在导轨上，将小车置于导轨上，使其能沿导轨自由滑动，此时，水平超声发射器、超声接收器组件（已固定在小车上）、红外接收器在同一轴线上。将组件电缆接入实验仪的对应接口上。安装完毕后，电磁铁组件放在轨道旁边，通过连接线给小车上的传感器充电，第一次充电时间约6~8秒，充满后(仪器面板充电灯变黄色或红色)可以持续使用4~5分钟。充电完成后连接线从小车上取下，以免影响小车运动。

注意事项：

- 1) 安装时要尽量保证红外接收器、小车上的红外发射器和超声接收器、超声发射器三者之间在同一轴线上，以保证信号传输良好；
- 2) 安装时不可挤压连接电缆，以免导线折断；
- 3) 安装时请确认橡胶圈是否套在主动轮上；
- 4) 小车不使用时应立放，避免小车滚轮沾上污物，影响实验进行。

2. 测量准备

- 1) 实验前须要在每个速度下测试传送带松紧度是否合适，具体依据可参见下文或表1，若存在过松或过紧的情况，那么需要根据测试结果调节传送带松紧度。

皮带过松，小车前进距离很不正常，因为带动皮带的主动轮与皮带之间打滑，小车自动返回后与控制器存在碰撞，有时甚至会出现较为剧烈的碰撞；当皮带过紧时，小车前进速度较慢，小车前进最大距离较近，小车后退时，运动吃力，容易使控制器进入保护状态（5个发光二极管闪烁，电机停止转动），此时手动滑动小车到控制器位置，恢复正常使用。对于松紧度合适的系统，小车退回后车体后端磁钢距离控制器表面应该在1-15mm之间。

2) 测试仪开机后, 首先要求输入室温。因为计算物体运动速度时要代入声速, 而声速是温度的函数。利用 ◀ ▶ 将室温 t_c 值调到实际值, 按“确认”。然后仪器将进行自动检测调谐频率 f_0 , 约几秒钟后将自动得到调谐频率, 将此频率 f_0 记录下来, 按“确认”进行后面实验。

3. 测量步骤

- 1) 在液晶显示屏上, 选中“多普勒效应验证实验”, 并按“确认”;
- 2) 利用 ◀ ▶ 键修改测试总次数 (选择范围 5~10, 因为有 5 种可变速度, 一般选 5 次), 按 ▼, 选中“开始测试”, 但不要按“确认”;
- 3) 用电机控制器上的“变速”按钮选定一个速度。准备好后, 按“确认”, 再按电机控制器上的“启动”键, 测试开始进行, 仪器自动记录小车通过光电门时的平均运动速度及与之对应的平均接收频率;
- 4) 每一次测试完成, 都有“存入”或“重测”的提示, 可根据实际情况选择, “确认”后回到测试状态, 并显示测试总次数及已完成的测试次数;
- 5) 按电机控制器上的“变速”按钮, 重新选择速度, 重复步骤 3、4;
- 6) 完成设定的测量次数后, 仪器自动存储数据, 并显示 f - V 关系图及测量数据。

注意事项:

小车速度不可太快, 以防小车脱轨跌落损坏。若出现故障, 请参见“故障现象、原因及处理方法”。

4. 数据记录与处理

由 f - V 关系图可看出, 若测量点成直线, 符合 (2) 式描述的规律, 即直观验证了多普勒效应。用作图法或线性回归法计算 f - V 关系直线的斜率 k 。公式 (4) 为线性回归法计算 k 值的公式, 其中测量次数 $i=5$ 。

$$k = \frac{\overline{V_i} \times \overline{f_i} - \overline{V_i} \times \overline{f_i}}{\overline{V_i}^2 - \overline{V_i}^2} \quad (4)$$

由 k 计算声速 $u = f_0/k$, 并与声速的理论值比较, 声速理论值由 $u_0 = 331(1 + t_c/273)^{1/2}$ (米/秒) 计算, t_c 表示室温 (摄氏温度, 单位 $^{\circ}\text{C}$)。测量数据的记录是仪器自动进行的。在测量完成后, 只需在出现的显示界面上, 用 ▼ 键翻阅数据并记入表 1 中, 然后按照上述公式计算出相关结果并填入表格。

表 2 多普勒效应的验证与声速的测量 $t_c = \quad ^{\circ}\text{C}$ $f_0 = \quad \text{Hz}$

测量数据						直线斜率 k (1/m)	声速测量值 $u=f_0/k$ (m/s)	声速理论值 u_0 (m/s)	百分误差 $(u-u_0)/u_0$
次数 i	1	2	3	4	5				

$V_i(\text{m/s})$									
$f_i(\text{Hz})$									

II、研究自由落体运动，求自由落体加速度

让带有超声接收器的接收组件自由下落，利用多普勒效应测量物体运动过程中多个时间点的速度，查看 $V-t$ 关系曲线，并调阅有关测量数据，即可得出物体在运动过程中的速度变化情况，进而计算自由落体加速度。

1. 仪器安装与测量准备

仪器安装如图 4 所示。为保证超声发射器与接收器在一条垂线上，可用细绳栓住接收器组件，检查从电磁铁下垂时是否正对发射器。若对齐不好，可用底座螺钉加以调节。

充电时，让电磁阀吸住自由落体接收器组件，并让该接收器组件上充电部分和电磁阀上的九爪测试针（即充电针）接触良好。

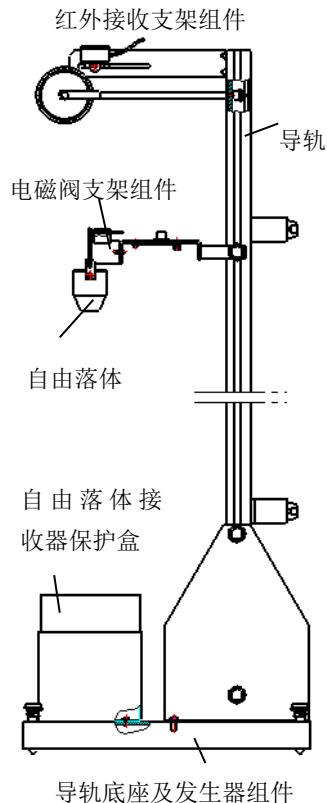


图 4 自由落体实验

充满电后，将接收器组件脱离充电针，下移吸附在电磁铁上。

2. 测量步骤

- 1) 在液晶显示屏上，用 ▼ 选中“变速运动测量实验”，并按“确认”；
- 2) 利用 ► 键修改测量点总数，选择范围 8~150；▼ 选择采样步距，◀ ► 修改采样步距，选择范围 10~100ms，选中“开始测试”；
- 3) 检查是否“失锁”，“锁定”后按“确认”按钮，电磁铁断电，接收器组件自由下落。测量完成后，显示屏上显示 V-t 图，用 ► 键选择“数据”，阅读并记录测量结果。
- 4) 在结果显示界面中用 ► 键选择“返回”，“确认”后重新回到测量设置界面。可按以上程序进行新的测量。

3. 数据记录与处理

将数据记入表 3 中，由测量数据求得 V-t 直线的斜率即为重力加速度 g。

为减小偶然误差，可作多次测量，将测量的平均值作为测量值，并将测量值与理论值比较，求百分误差；考虑到断电瞬间，电磁铁可能存在剩磁，第一次采样数据的可靠性降低，故从第 2 各采样点开始记录数据。

采样序号 i	2	3	4	5	6	7	8	9	g (m/s ²)	平均值 g(m/s ²)	理论值 g ₀ (m/s ²)	百分误差 (g-g ₀)/g ₀
t _i =0.05(i-1) (s)	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30	0.35	0.40				
V _i										9.8		
V _i												
V _i												
V _i												

表 3 自由落体运动的测量

注：表 3 中 t_i=0.05(i-1)，t_i 为第 i 次采样与第 1 次采样的时间间隔，0.05 表示采样步距为 50ms。如果选择的采样步距为 20ms，则 t_i 应表示为 t_i=0.02(i-1)。依次类推，根据实际设置的采样步距而定采样时间。

注意事项：

- 1) 须将“自由落体接收器保护盒”套于发射器上，避免发射器在非正常操作时受到冲击而损坏；
- 2) 安装时切不可挤压电磁阀上的电缆；

3) 接收器组件下落时, 若其运动方向不是严格的在声源与接收器的连线方向, 则 α (为声源与接收器连线与接收器运动方向之间的夹角, 图 4 是其示意图) 在运动过程中增加, 此时公式 (2) 不再严格成立, 由 (3) 式计算的速度误差也随之增加。故在数据处理时, 可根据情况对最后 2 个采样点进行取舍。

4)

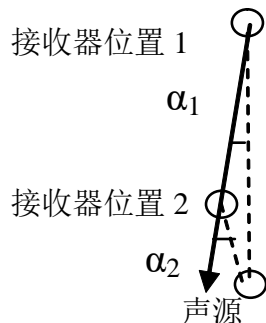


图 5 运动过程中 α 角度变化示意图

III、研究简谐振动

当质量为 m 的物体受到大小与位移成正比, 而方向指向平衡位置的力的作用时, 若以物体的运动方向为 x 轴, 其运动方程为:

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = -kx \quad (5)$$

由 (5) 式描述的运动称为简谐振动, 当初始条件为 $t=0$ 时, $x = -A_0$, $V = dx/dt = 0$, 则方程 (5) 的解为:

$$x = -A_0 \cos \omega_0 t \quad (6)$$

将 (6) 式对时间求导, 可得速度方程:

$$V = \omega_0 A_0 \sin \omega_0 t \quad (7)$$

由 (6)(7) 式可见物体作简谐振动时, 位移和速度都随时间周期变化, 式中 $\omega_0 = (k/m)^{1/2}$, 为振动系统的固有角频率。

测量时仪器的安装如图 6, 若忽略空气阻力, 根据胡克定律, 作用力与位移成正比, 悬挂在弹簧上的物体应作简谐振动, 而 (5) 式中的 k 为弹簧的倔强系数。

1. 仪器安装与测量准备

仪器的安装如图 6 所示。将弹簧悬挂于电磁铁上方的挂钩孔中, 接收器组件的尾翼悬挂在弹簧上。接收组件悬挂上弹簧之后, 测量弹簧长度。加挂质量为 m 的砝码, 测量加挂砝码后弹簧的伸长量 Δx , 记入表 4 中, 然后取下砝码。由 m 及 Δx 就可计算 k 。用天平称量垂直运动超声接收器组件的质量 M , 由 k 和 M 就可计算 ω_0 , 并与角频率的测量值 ω 比较。

2. 测量步骤:

- 1) 在液晶显示屏上, 用 \blacktriangledown 选中“变速运动测量实验”, 并按“确认”;
- 2) 利用 \blacktriangleright 键修改测量点总数为 150 (选择范围 8~150), \blacktriangledown 选择采样步距, 并修改为 100 (选择范围 50~100ms), 选中“开始测试”;
- 3) 将接收器从平衡位置垂直向下拉约 20cm, 松手让接收器自由振荡, 然

后按“确认”，接收器组件开始作简谐振动。实验仪按设置的参数自动采样，测量完成后，显示屏上出现速度随时间变化关系的曲线；

4) 在结果显示界面中用 ► 键选择“返回”，“确认”后重新回到测量设置界面。可按以上程序进行新的测量。

注意事项：

接收器自由振荡开始后，再按“确认”键。

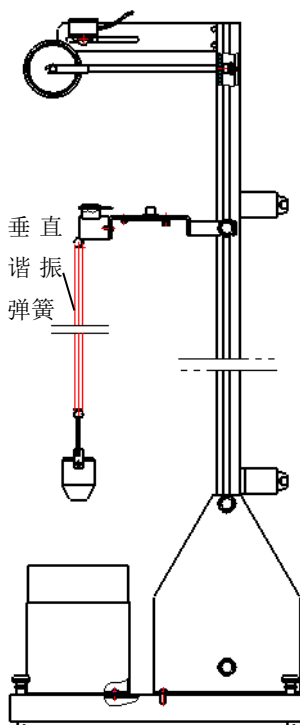


图 6 简谐振动实验

3. 数据记录与处理

查阅数据，记录第 1 次速度达到最大时的采样次数 $N_{1\max}$ 和第 11 次速度达到最大（注：速度方向一致）时的采样次数 $N_{11\max}$ ，就可计算实际测量的运动周期 T 及角频率 ω ，并可计算 ω_0 与 ω 的百分误差。

表 4 简谐振动的测量

$M =$ kg $m =$ kg

Δx (m)	$k=mg/\Delta x$ (kg/s ²)	$\omega_0=(k/M)^{1/2}$ (1/s)	$N_{1\max}$	$N_{11\max}$	$T=0.01(N_{11\max}-N_{1\max})$ (s)	$\omega=2\pi/T$ (1/s)	百分误差 $(\omega-\omega_0)/\omega_0$

IV、研究匀变速直线运动，验证牛顿第二运动定律

质量为 M 的接收器组件，与质量为 m 的砝码组件（包括砝码托及砝码）悬挂于滑轮的两端（ $M > m$ ），系统的受力情况为：

接收器组件的重力 gM ，方向向下。砝码组件通过细绳和滑轮施加给接收器组件的力 gm ，方向向上。摩擦阻力，大小与接收器组件对细绳的张力成正比，可表示为 $C(g-a)M$ ， a 为加速度， C 为摩擦系数，摩擦力方向与运动方向相反。

系统所受合外力为 $gM - gm - C(g-a)M$ 。

运动系统的总质量为 $M + m + J/R^2$ 。

J 为滑轮的转动惯量， R 为滑轮绕线槽半径， J/R^2 相当于将滑轮的转动等效于线性运动时的等效质量。

根据牛顿第二定律，可列出运动方程：

$$gM - gm - C(g-a)M = a(M + m + J/R^2) \quad (8)$$

实验时改变砝码组件的质量 m ，即改变了系统所受的合外力和质量。对不同的组合测量其运动情况，采样结束后会显示 $V-t$ 曲线，将显示的采样次数及对应速度记入表 5 中。由记录的 t ， V 数据求得 $V-t$ 直线的斜率即为此次实验的加速度 a 。

(8) 式可以改写为：

$$a = g[(1-C)M - m] / [(1-C)M + m + J/R^2] \quad (9)$$

将表 4 得出的加速度 a 作纵轴， $[(1-C)M - m] / [(1-C)M + m + J/R^2]$ 作横轴作图，若为线性关系，符合 (9) 式描述的规律，即验证了牛顿第二定律，且直线的斜率应为重力加速度。

在我们的系统中，摩擦系数 $C = 0.07$ ，滑轮的等效质量 $J/R^2 = 0.014\text{kg}$

1. 仪器安装

1) 仪器安装如图 7 所示，让电磁阀吸住接收器组件，测量准备同实验二。

2) 用天平称量接收器组件的质量 M ，砝码托及砝码质量，每次取不同质量的砝码放于砝码托上，记录每次实验对应的 m 。

注意事项：

安装滑轮时，滑轮支杆不能遮住红外接收和自由落体组件之间信

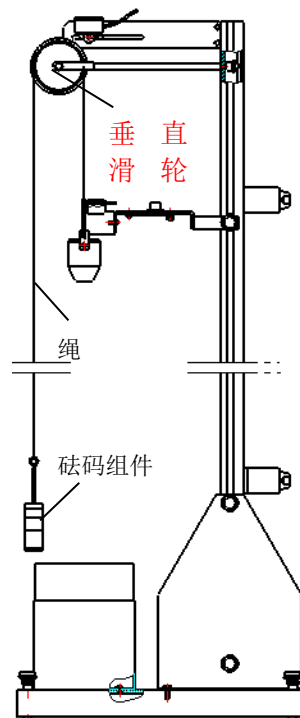


图 7 验证牛顿第二定律实验

号传输。其余注意事项同实验二。

2. 测量步骤

- 1) 在液晶显示屏上，用 ▼ 选中“变速运动测量实验”，并按“确认”；
- 2) 利用 ► 键修改测量点总数，选择范围 8~150，推荐总数 15，▼ 选择采样步距，并修改为 100 ms（选择范围 50~100ms），选中“开始测试”；
- 3) 按“确认”后，电磁铁断电，接收器组件拉动砝码作垂直方向的运动。测量完成后，显示屏上出现测量结果。
- 4) 在结果显示界面用 ► 键选择“返回”，“确认”后重新回到测量设置界面。改变砝码质量，按以上程序进行新的测量。

3. 数据记录与处理

采样结束后显示 V-t 直线，用 ► 键选择“数据”，将显示的采样次数及相应速度记入表 5 中， t_i 为采样次数与采样步距的乘积。由记录的 t、V 数据求得 V-t 直线的斜率，就是此次实验的加速度 a。

注意事项：




- 1) 当砝码组件质量较小时，加速度较大，可能没几次采样后接收器组件已落到底，此时可将后几次的速度值舍去。
- 2) 砝码组件质量较小时，加速度较大，由于惯性，砝码组件将高过并碰撞滑轮，此时，可系绳一端于砝码组件底部，另一端系于底座调平螺钉上，绳长略小于滑轮与底座螺钉之间的距离。
- 3) 当砝码组件质量较大时，加速度较小，短时间内环境影响较大，导致前期采样数据的可靠性偏低，故可从中间某适当值开始记录，且不同的砝码组件下均连续记录 8 个数据点。

采样序号 i	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	加速度 a (m/s ²)	m (kg)	[(1-C)M-m]/ [(1-C)M+m+J/R ²]
$t_i=0.1(i-1)$ (s)	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2	1.3			
V_i																
V_i																
V_i																

又可查阅测量数据作进一步的定量分析。特别适合用于综合实验，让学生自主的对一些复杂的运动进行研究，对理论上难于定量的因素进行分析，并得出自己的结论(如研究摩擦力与运动速度的关系，或与摩擦介质的关系)。

附录 1 多普勒效应部分组件实物示意图

 <p>自由落体组件</p>	 <p>水平谐振弹簧、垂直谐振弹簧</p>	 <p>小车及传感接收器组件</p>
 <p>超声波发射组件</p>	 <p>红外接收器组件</p>	 <p>导轨夹板及插条组件</p>
 <p>光电门组件</p>	 <p>滑轮组件</p>	 <p>导轨底座及发生器组件</p>
 <p>电磁阀组件</p>	 <p>砝码组件</p>	

		自由落体接收器保护盒组件
 <p>导轨支架组件</p>	 <p>挡块组件</p>	 <p>电机控制器组件</p>

实验六 声波和振动

I 声音的研究

[实验目的]

1. 使用 Science Workshop 界面，研究通过乐器发出的声音的音调和实验者所发出声波的音调，并通过本实验熟悉声音传感器的特性和应用。
2. 采集、分析声波，通过波形和改变声频，分析波长和频率之间的关系。

[仪器与元件]

1. 计算机（windows 98,2000,XP,内存 16MB,光驱，硬盘 20MB）。
2. Science Workshop 750型工作站。



3. musical instrument 乐器.
4. Sound Sensor 声音传感器.
5. 发音管.
6. Power Amplifier 功率放大器.
7. Speaker 扬声器.
8. DataStudio 软件

[实验原理]

人们平常听到的大部分声音是噪音，如物体的撞击声、掌声、交通工具发出的声音

以及大多数人的说话声均为噪音。噪音的产生是由于一些不规则的振动而引起的耳鼓的不规则振动。

音乐的声音有不同的特征,它通过一些有规则的振源产生一些有或多或少周期性的音调。(当然,乐器也可以制造噪音!)。描绘乐音的曲线是一种一再重复自身的形状,表明乐音有固定的波形。当测量从声波传感器产生的电信号时,示波器就会显示这些图像。

毕达哥拉斯发现当弦的长度之比为整数时,乐器上一起演奏的音符非常悦耳。毕达哥拉斯提出了频率的概念。一个频率增加的音符序列构成一个音阶,存在很多不同的音阶。在很多西方文明中,最简单的音阶是“只有大音阶”(例如,“do-re-mi-fa-so-la-ti-do”)。在这个音阶中,两个连续的音符的频率之比是 9:8、10:9 或 16:15。例如,“re”(297 Hz)与“do”(264 Hz)的频率之比为 9:8 (或 1.125)。大多数西方音乐都是用“平和音阶”写的,这种音阶具有 13 个音符和 12 个音程。所有连续音符的频率之比都是相等的(1.05946)。

Science Workshop 750 接口可以同时产生输出信号并监测输入信号。本实验将用接口来探测接口产生的音调、乐器发出的声音和实验者本人发出的声波。试着做这些实验,以熟悉声音传感器的作用。

[实验内容]

(一). 测试乐器的声音:

用声音传感器测量一个乐器发出的声音:例如口琴的声音、谐波合成器的声音;或发音管的声调. Science Workshop 750 的应用程序 DataStudio 软件将监测和显示声音传感器测得的信号。了解声音的频率和波形,了解声音传感器的作用。

(二). 测试人的声音:

用声音传感器测量人发出的声音。Science Workshop 计算机 DataStudio 软件将监测和显示声音传感器测得的信号,了解人的声音的频率、波形。并与乐器的声音作比较。

(一). 测试乐器的声音

一. 实验步骤:

(一) 计算机设置:

1. 把 Science Workshop 750 科学工作站的 USB 接口连接到计算机上, 将声音传感器 DIN 插入 750 工作站面板的模拟频道 A 中, 打开科学工作站后面板上的开关。


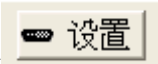
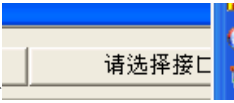
2. 然后打开计算机, 点击桌面上的 DataStudio 的文件。(DataStudio 软件的使用, 参见附录一中的 DataStudio 软件使用说明。)

3. 文件打开后可显示一个示波器图像显示、一个快速傅里叶变换 (FFT) 显示和一个信号发生器窗口。这部分如有一个能熟悉操作计算机的实验者会更容易一些。

计算机设置具体步骤如下:

1. 双击桌面上的 DataStudio 软件图标  , 出现如下画面:



2. 然后单击  创建实验 , 单击  设置 , 单击  请选择接口 , 出现如下画面:




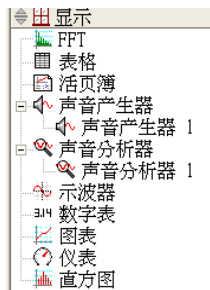
3. 选择  确定后，出现如下画面：





4. 在 750 工作站的 A B C 三个通道中，任意选择一个，单击，（注意：声音传感器一定要在这之前插在相应的通道上，比如，声音传感器已插在 A 通道，那么就单击 A。出现如下画面：



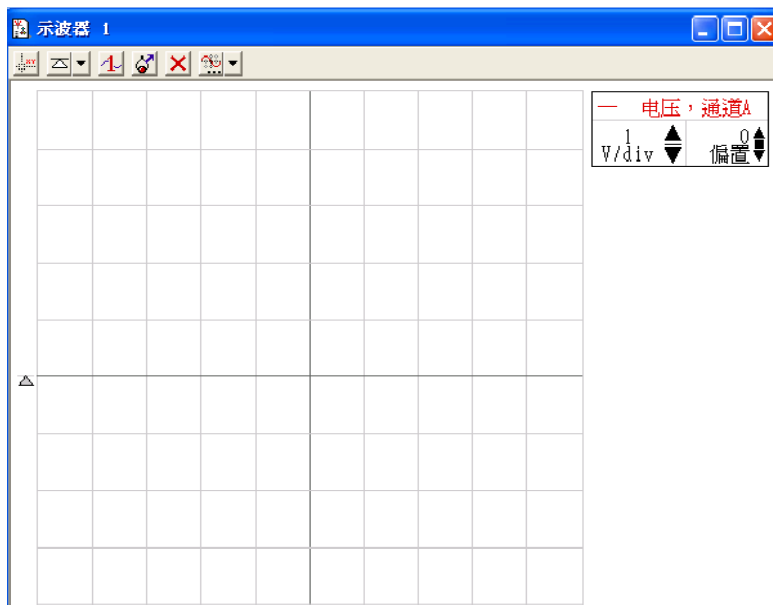
5. 选择  声音传感器 ，点击确定。



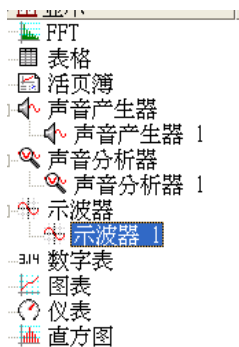
6. 在  示波器 中，双击  示波器 ，出现如下画面：



选择 **电压，通道A (V)**，点击确定，出现如下示波器画面：

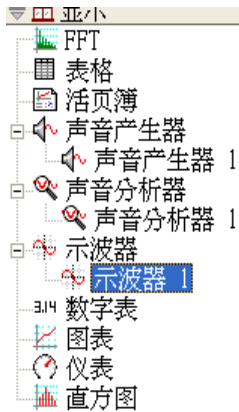


这样设置后，可在示波器画面即时出现所测试的声音图形显示。
若想观察 FFT，请先将“示波器”模式删除，具体如下：




7. 在显示方式表
“Del”键。

中，选中 **示波器 1**，然后按键盘上的



8. 然后双击

中的  FFT , 同样选择  电压, 通道A (V) , 确定。

声音传感器校准和设备设置

1. 你无须校准声音传感器和功率放大器。
2. 将扬声器连接到功率放大器的输出插孔中。
3. 调整乐器使你能够向声音传感器演奏音乐. 使声音传感器可以探测到信号。

二. 测试乐器数据记录

1. 单击**开始**按钮开始监测数据。数据图形应该显示在示波器和FFT显示图表中。
2. 第一个信号发生器的频率为264Hz（“只有大音阶”中的“do”）。将声音传感器放置在扬声器附近。考察FFT显示。将FFT中的基准频率与信号发生器中的输出频率做比较。
3. 灵敏光标来更准确的测量FFT中的基准频率。（注意：要提高灵敏光标的分辨率，可将FFT显示扩大）。

4. 频率调整：

你可以用光标单击频率“上-下”箭头来调整输出频率。你也可以从键盘上键入数值。要从键盘上键入数值，可单击一次频率值。当你键入新值时，将出现一个小编辑框。按下<return>或<enter>键来确认这个值。当使用光标和鼠标按钮来单击频率值旁边的“上——下”箭头时，缺省的改变是每次单击为 10Hz。你可以用修正键（控制、选择和命令或 CTRL 和 ALT）来增加或减少每次单击改变的数量。

Macintosh Key Windows Key (s) _ frequency

Shift key	Shift key	100 Hz
No modifier key	No modifier key	10 Hz
Control key	Ctrl key	1 Hz
Option key	Alt key	0.1 Hz
Command key	Alt + Ctrl keys	0.01 Hz

5. 在第一个音阶上键入下一个频率，并单击 enter。象前面一样，测量 FFT 显示中每个音符的频率。

对第一个音阶中其余的频率重复这一过程。

Note 音符 Letter name 字母名称 Frequency 频率 (Hz)

do	C	264
re	D	297
me	E	330
fa	F	352
so	G	396
la	A	440
ti	B	495
do	C(octave higher)	528

全音阶的Diatonic C Major scale大音阶 (just major scale) (只有大音阶)

6. 对第二个音阶（平和音阶）重复这一过程。

Note 音符 Letter name 字母名称 Frequency 频率 (Hz)

do	C	262
	C	Sharp 277
re	D	294
	D	Sharp 311
me	E	330
fa	F	349
	F	Sharp 370
so	G	392
	G	Sharp 415
la	A	440
	A	Sharp 466
ti	B	494
do	C	(octave higher) 524

7. 单击**停止键**，停止监测数据。

8. 关掉功率放大器。

[数据分析]

1. 全音阶中的音符与半音阶中的音符相比较如何？
2. 在乐器上描述一个单音符的波形，它有谐波吗？
3. 任一个音阶中的任何音符都有谐振频率吗？
4. 如果此音符有谐波，谐波频率与基本频率相比如何？

四. 注意事项

- 1、要充分了解清楚各装置和传感器元件的原理和功能后，才可动手操作。
- 2、使用计算机前，需熟悉和掌握 Data studio 软件的使用说明，详见附录一。

(二). 测试人的声音

[实验步骤]

(一) Computer Setup 计算机设置:

计算机设置与测试乐器部分相同。

(二) 传感器校准和设备设置

1. 无须校准声音传感器。
2. 调整声音传感器的位置，以便它可以记录你的声音。

[数据记录]

1. 单击 (MON) 监测按钮开始监测数据。数据应该显示在示波器和 FFT 显示中。
2. 你对着声音传感器“唱”出一个单音符。
3. 观察显示屏中你的歌声的波形。尝试以大致相同的调子发出不同的元音来进行实验，例如从“OO”转换到“EE”再到“UU”再到“AY”。然后尝试其它的口型。
4. 测量FFT显示中的基础频率和谐波频率。
5. 对着声音传感器用“口哨”吹出一个单音符。考察示波器中的波形，并测量 FFT 显示中的基础频率和谐波频率。

6. 改变你的口哨的调子。考察波形并测量频率。
7. 变化音高，检查波形测量频率。
8. 单击 STOP 停止数据记录。

[数据分析]

1. 描绘你唱的音符的波形。这个音符具有谐振频率吗？
2. 你唱的单音符的波形与乐器演奏的单音符的波形相比较如何？它与乐器的一个单音符有何区别？
3. 如果这个音符具有谐振频率，每个谐振频率的值与基准频率的值相比较如何？
4. 哪个元音的波形最简单？哪个元音的波形最复杂？

[注意事项]

- 1、要充分了解清楚各装置和传感器元件的原理和功能后，才可动手操作。
- 2、使用计算机前，需熟悉和掌握 Data studio 软件的使用说明，详见附录一。

II 驻波的研究

[实验目的]

观察机械波作用与细绳时形成的驻波现象，了解驻波的形成原理，波长、线长、频率的关系等。

[仪器与元件]

1. 使用 Science Workshop 750 上的信号输出 OUTPUT



2. 机械波驱动装置：（功能：在各种波动实验中产生频率可调、幅度可调的机械振动，用于驱动绳波。（功能：可输出频率达到 800HZ 的正弦波）



3. 弹性波动细绳。

[实验原理]

一切机械波，在有限大小的物体中进行传播时会形成各式各样的驻波。驻波是常见的一种波的叠加现象，它广泛存在于自然界中。驻波理论在声学、光学及无线电中都有着重要的应用，如用来测定波长、波速或确定波动频率等。

一简谐正弦波在拉紧的细绳上传播,可以由方程式 $y_1 = y_m \sin 2\pi(x/\lambda - ft)$ 来描述。
若细绳的另一端固定,波到达该端时将被反射回来,反射波方程式为:

$$y_2 = y_m \sin 2\pi(x/\lambda + ft).$$

叠加后的波形为两波形之和:

$$y = y_1 + y_2 = y_m \sin 2\pi(x/\lambda - ft) + y_m \sin 2\pi(x/\lambda + ft).$$

根据三角函数的公式:

$$\sin A + \sin B = 2\sin[(A+B)/2] \cdot \cos [(A-B)/2]$$

上式可改写为:

$$y = 2y_m \sin(2\pi x/\lambda) \cos(2\pi ft)$$

该方程具有一些特点:

对某一时刻 t_0 , 细线上的波形为一正弦波, 最大波幅为: $2y_m \cos(2\pi ft_0)$.

对某一位置 x_0 , 细线也表现为谐振动, 最大振幅为: $2y_m \cos(2\pi x_0/\lambda)$.

当 $x_0 = 0, \lambda/2, 3\lambda/2, 2\lambda$ 等, 波幅为 0。该种波形即为驻波, 因为细线上并没有波形的传播。时间方向的驻波, 其表现形式如下图:

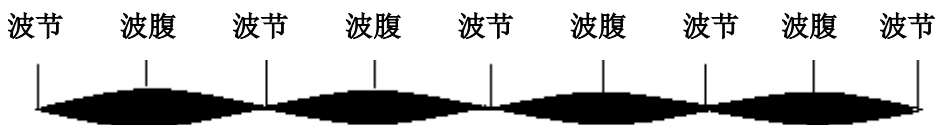


图: 细线上形成的驻波

最大振幅处即为波腹, 振幅为零处即为波节。通过分析, 可得出结论:
形成驻波时, 线长与波长的关系为: 线长为半波长的整数倍。

$$\text{即: } \lambda = 2L/n;$$

$n = 1, 2, 3, 4, \dots$ 的节点一定位于两固定端。

[实验步骤]

如图所示：



1. 将机械波动驱动装置接 Science Workshop 750 上的信号输出 OUTPUT。
2. 将细绳的一端固定在波动驱动装置的轴上，另一端用手扯住。
3. 打开功率放大器电源，波动驱动装置产生机械振动。
4. 观察细绳上产生的驻波现象，观察波腹与波节与波长的关系。
5. 改变驱动装置产生的振动频率大小，观察驻波的变化。
6. 改变细绳子的长度（手动控制），观察驻波的变化。

[实验分析]

1. 观察弦上出现的驻波，分析频率、波速、弦上张力与波长的关系。
2. 在同一弦长，同样张力下，改变七组频率 f_i ，测量相应的波长 λ_i ，绘制 $f_i-\lambda_i$ 曲线；
 3. 在同一弦长下，改变七组张力 T_i ，保持频率 f 不变，测理相应波长 λ_i ，计算测速 v_i ，绘制 $T_i-\lambda_i$ 曲线；假设弦被拉伸时是弹性的，则可用弦的伸长量为张力量度。

实验七：摆特性的研究

一、实验目的

- (1) 掌握复摆物理模型的分析。
- (2) 通过实验学习用复摆测量重力加速度的方法。

二、实验仪器

复摆装置、多功能微秒计 DHTC-1。

三、实验原理

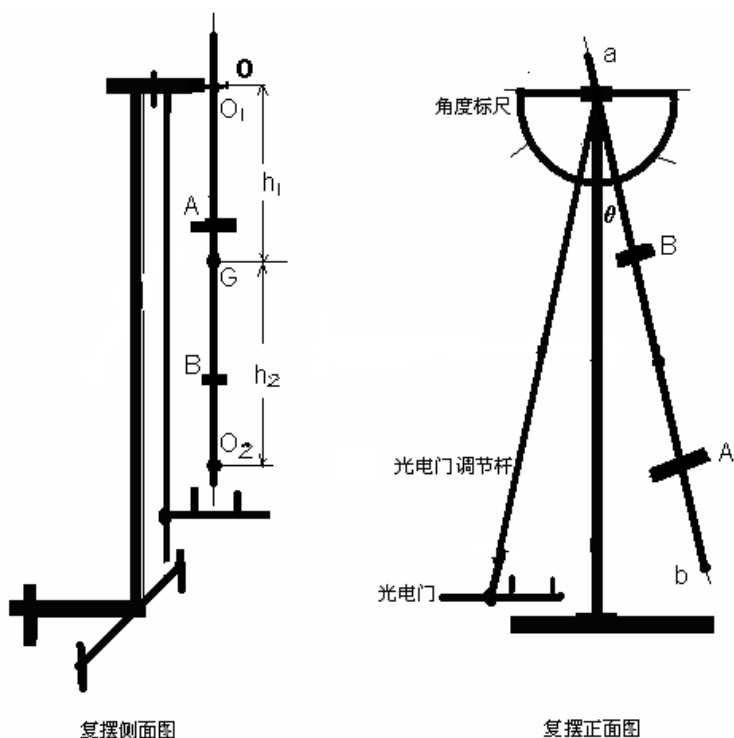


图 1 复摆结构示意图

复摆是一刚体绕固定的水平轴在重力的作用下作微小摆动的动力运动体系。如图 1 所示，刚体绕固定轴 O 在竖直平面内作左右摆动， G 是该物体的质心，与轴 O 的距离为

h , θ 为其摆动角度。若规定右转角为正, 此时刚体所受力矩与角位移方向相反, 即有

$$M = -mgh \sin \theta \quad (1)$$

又据转动定律, 该复摆又有

$$M = I \ddot{\theta} \quad (2)$$

其中 I 为该物体转动惯量。由 (1) 和 (2) 可得

$$\ddot{\theta} = -\omega^2 \sin \theta \quad (3)$$

其中 $\omega^2 = \frac{mgh}{I}$ 。若 θ 很小时 (θ 在 5° 以内) 近似有

$$\ddot{\theta} = -\omega^2 \theta \quad (4)$$

此方程说明该复摆在小角度下作简谐振动, 该复摆振动周期为

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{I}{mgh}} \quad (5)$$

设 I_G 为转轴过质心且与 O 轴平行时的转动惯量, 那么根据平行轴定律可知

$$I = I_G + mh^2 \quad (6)$$

代入上式得:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{I_G + mh^2}{mgh}} \quad (7)$$

根据 (7) 式, 可测量重力加速度 g , 其实验方案有多种, 选择其中的三种加以介绍。

实验方案一:

对于固定的刚体而言, I_G 是固定的, 因而实验时, 只需改变质心到转轴的距离 h_1, h_2 , 则刚体周期分别为

$$T_1 = 2\pi \sqrt{\frac{I_c + mh_1^2}{mgh_1}} \quad (8)$$

$$T_2 = 2\pi \sqrt{\frac{I_c + mh_2^2}{mgh_2}} \quad (9)$$

为了使计算公式简化，故取 $h_2 = 2h_1$ ，合并(8)式和(9)式得：

$$g = \frac{12\pi^2 h_1}{(2T_2^2 - T_1^2)} \quad (10)$$

为了方便确定质心位置 G，实验时可取下摆锤 A 和 B。自己设计实验测量方案 and 数据处理方案。

实验方案二：

设(6)式中的 $I_G = mk^2$ ，代入(7)式，得

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{mk^2 + mh^2}{mgh}} = 2\pi \sqrt{\frac{k^2 + h^2}{gh}}, \quad (11)$$

式中 k 为复摆对 G 轴的回转半径，h 为质心到转轴的距离。对(11)式平方，并改写成

$$T^2 h = \frac{4\pi^2}{g} k^2 + \frac{4\pi^2}{g} h^2, \quad (12)$$

设 $y = T^2 h$ ， $x = h^2$ ，则(12)式改写成

$$y = \frac{4\pi^2}{g} k^2 + \frac{4\pi^2}{g} x, \quad (13)$$

(13) 式为直线方程，实验时取下摆锤 A 和 B，测出 n 组(x, y)值，用作图法或最小二法

求直线的截距 A 和斜率 B，由于 $A = \frac{4\pi^2}{g} k^2$ ， $B = \frac{4\pi^2}{g}$ ，所以

$$g = \frac{4\pi^2}{B}, \quad k = \sqrt{\frac{Ag}{4\pi^2}} = \sqrt{\frac{A}{B}}, \quad (14)$$

由(14)式可求得重力加速度 g 和回转半径 k。

实验方案三

在摆杆上加上摆锤 A 和 B，使之摆动，如摆角较小，其周期 T_1 将等于

$$T_1 = 2\pi \sqrt{\frac{I_1}{M g h_1}}, \quad (15)$$

式中 I_1 是可逆摆以 O_1 为轴转动时的转动惯量, M 为摆的总质量, g 为当地的重力加速度, h_1 为支点 O_1 到摆的质心 G 的距离。又当以 O_2 为支点摆动时, 其周期 T_2 将等于

$$T_2 = 2\pi \sqrt{\frac{I_2}{M g h_2}} \quad (16)$$

式中 I_2 是以 O_2 为轴时的转动惯量, h_2 为 O_2 到 G 的距离。

设 I_G 为可逆摆对通过质心的水平轴的转动惯量, 根据平行轴定理

$$I_1 = I_G + M h_1^2, I_2 = I_G + M h_2^2, \text{所以式 (15) 和 (16)}$$

可改写成

$$T_1 = 2\pi \sqrt{\frac{I_G + M h_1^2}{M g h_1}} \quad (17)$$

$$T_2 = 2\pi \sqrt{\frac{I_G + M h_2^2}{M g h_2}} \quad (18)$$

从上述二式消去 I_G 和 M , 可得

$$g = \frac{4\pi^2(h_1^2 - h_2^2)}{T_1^2 h_1 - T_2^2 h_2} \quad (19)$$

在适当调节摆锤 A、B 的位置之后, 可使 $T_1 = T_2$, 令

此时的周期值为 T , 则

$$g = \frac{4\pi^2}{T^2}(h_1 + h_2), \quad (20)$$

上式中 $h_1 + h_2$, 即 $O_1 O_2$ 间的距离, 设为 l , 则

$$g = \frac{4\pi^2}{T^2} l, \quad (21)$$

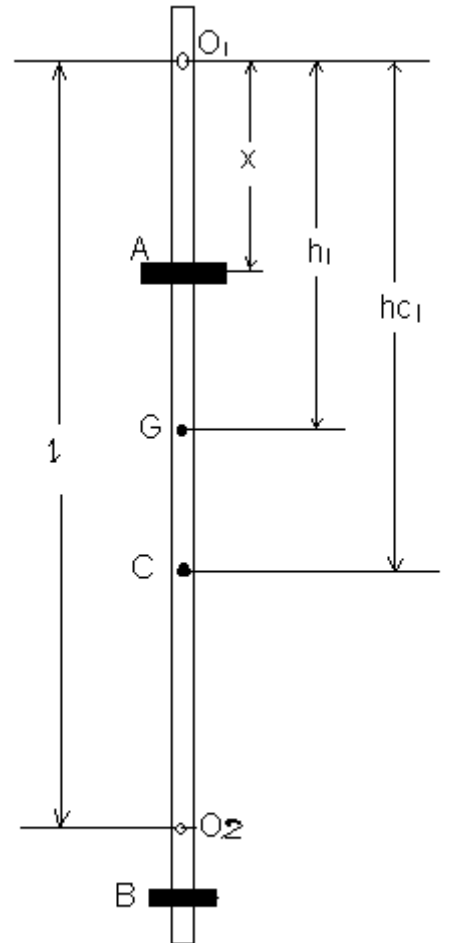


图2

由(21)式知, 测出复摆正挂与倒挂时相等的周期值 T 和 l , 就可算出当地的重力加速度之值。式中 l 为二转轴的距离, 能测得很精确, 所以能使测量 g 值的准确性提高。

为了寻找 $T_1 = T_2$ 的周期值, 就要研究 T_1 和 T_2 在移动摆锤时的变化规律。设在 O_1O_2 间的摆锤 A 的质量为 m_A , O_1 到 A 的距离为 x 并取 $\overline{O_1O_2}$ 为正方向, 如图 2 所示, 除去摆锤 A 之外摆的质量为 m_0 , 对 O_1 的转动惯量为 I_0 , 质心在 C 点, 令 $O_1C = hc_1$ 。由于摆锤 A 较小, (17) 式可近似写成为

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{I_0 + m_A x^2}{(m_0 hc_1 + m_A x)g}} \quad (22)$$

由此式可知, 此摆在以 O_1 为轴时的等值摆长 l_1 等于

$$l_1 = \frac{I_0 + m_A x^2}{m_0 hc_1 + m_A x} \quad (23)$$

经分析可知, 在一定条件下 $\frac{dl_1}{dx} = 0$, 并且 $\frac{d^2l_1}{dx^2} > 0$, 即在

改变 A 锤位置时, 等值摆长 l_1 有一极小值, 亦即周期 T_1 有一极

小值, 并且和此极小值对应的 x 小于 l 。这说明当 A 锤从 O_1 移向 O_2 时, T_1 的变化如图 3 所示, 当 x 开始增加时 T_1 先是减小, 在 T_1 达到极小值之后又增加。 T_2 的变化规律和 T_1 的相似, 但是变化较明显。

本实验为了利用式 (21) 计算 g 值, 就必需在移动 A 锤过程中, 使 T_1 曲线和 T_2 曲线相交。理论分析和实际测量都表明, T_1 和 T_2 二曲线是否相交决定于摆锤 B 的位置 (图 4), 本实验是通过实际测量来确定能使 T_1 、 T_2 曲线相交的 B 锤的位置 (图 4 (b))。

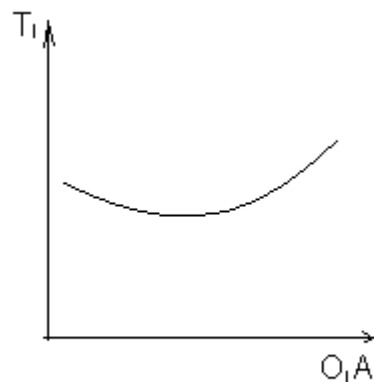


图3

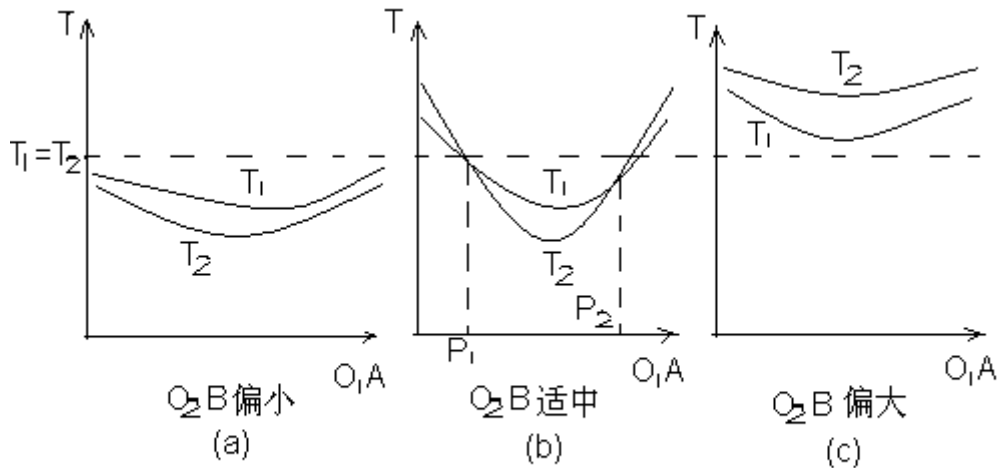


图4

四、实验内容

1. 确定 B 锤的位置 在摆杆的两端分别固定一挡光片。光电门置于摆下端的挡光片处并和数字微秒计连接好，并使用能测周期的功能部分。

将 A 锤置于 O_1O_2 的中点处，B 锤置于 O_2 外侧的中间，测 T_1 和 T_2

(只测一个摆动周期)，若 $T_1 > T_2$ ，那将属于图 4 (a) 或 (b) 的情形。将 A 锤移至 O_2 附近， $\overline{AO_2}$ 约 10cm 处 (B 不动) 再测 T_1 和 T_2

，如果此时 $T_1 < T_2$ ，就说明 B 锤的位置适合 (b)，亦即适合实验的要求，在以下的测量中 B 锤即固定在此位置。若是测量结果和上述的不一致，就要参照图 4 去改变 B 锤的位置，直至和上述要求一致时为止。

2. 测绘 T_1 、 T_2 曲线 将 A 锤置于 $\overline{O_1A}$ 约等于 10cm 处，测 T_1 和 T_2 。其次，每将 A 锤移动 10cm 测一下 T_1 和 T_2 ，直至 $\overline{AO_2}$ 大约为 10cm 时为止。

以 O_1A 为横坐标，周期为纵坐标作图线 (如图 4 (b))，二曲线交点对应的 $\overline{O_1A}$ 值为 P_1 和 P_2 ，对应的周期应相等。

3. 测量 $T_1 = T_2 = T$ 的精确值 将 A 锤置于 P_2 处 (该点对应的二曲线的交角较大), 测 T_1 和 T_2 , 各重复测 10 次后取平均值 (由于这次测得较精细, 将发现 T_1 和 T_2 不等, 即以
前测得的 P_2 不准), 当 $T_1 < T_2$ 时, 就使 $\overline{O_1A}$ 减少 2mm (若是 $T_1 > T_2$ 就使 $\overline{O_1A}$ 增加 2mm), 再
同上法测周期为 T'_1 和 T'_2 , 这时应当是 $T'_1 > T'_2$ (若是实际测量结果仍然是 $T'_1 < T'_2$ 时,
就要再移动 A 锤去测量)。

在这一步测量时, 要使每次摆尖的位移 (振幅) 相同, 并测出其大小 s , 如支点到摆尖
的长度为 L , 则摆角 $\theta = \frac{s}{L}$, 在小摆角 θ 测得的周期 T_θ 和摆角近于零时的周期 T_0 之间存在
如下关系

$$T_0 = T_\theta \left(1 - \frac{\theta^2}{16} \right) \quad (24)$$

测量所得各周期值, 要根据上式改正成为摆角近于零时的周期。

用测得的 T_1 、 T_2 、 T'_1 和 T'_2 参照图 4 作图线, 其交点所对应的周期值就是所求的 T_1
 $= T_2 = T$ 的数值。

4. 测量二转轴的距离 l 。

5. 将第 3、4 步求出的 T 和 l 值代入式 (21), 求出当地的重力加速度 g 之值并求其
标准偏差。

附录 复摆实验装置

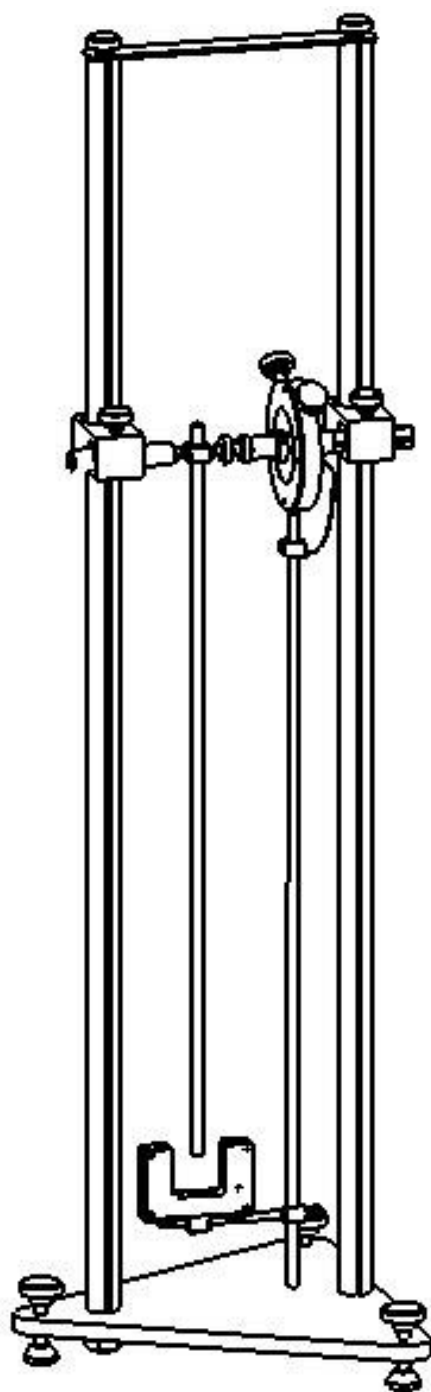


图 1

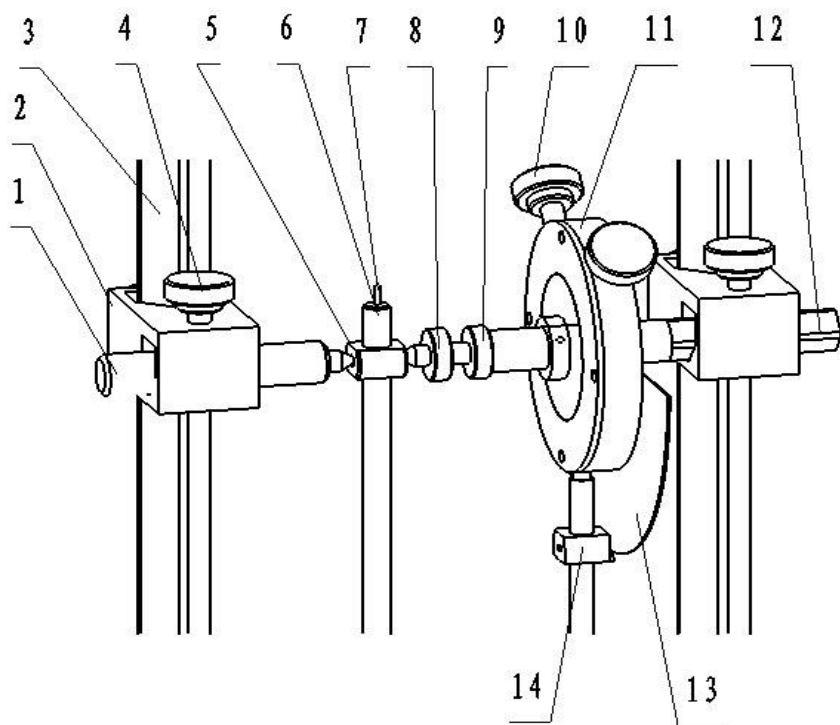


图 2

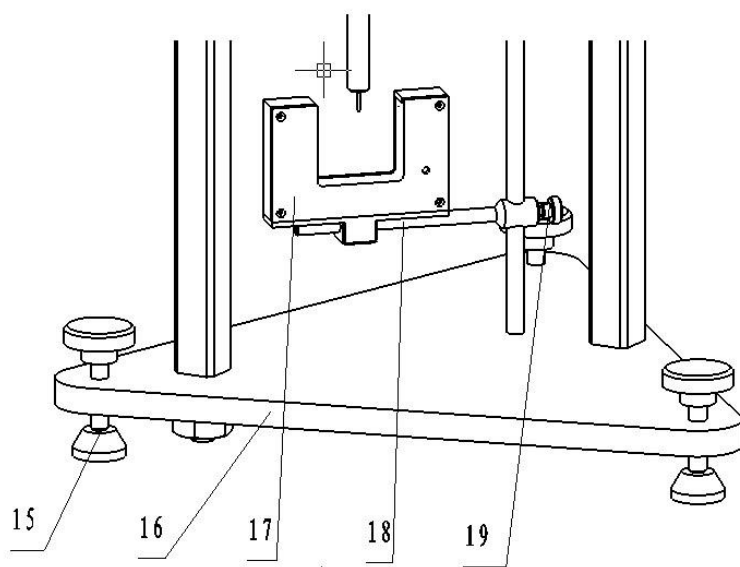


图 3

1—左侧顶尖 2—夹座 3—支架柱 4—锁紧螺钉（1） 5—摆杆座 6—摆杆 7—挡光针 8—右侧顶尖 9—锁紧螺帽 10—锁紧螺钉（2） 11—转动圆环 12—顶尖轴 13—刻度盘 14—一刻度指针 15—底座脚 16—底座 17—光电门 18—光电门安装轴 19—锁紧螺钉（3）

说明：

1. “左侧顶尖”和“右侧顶尖”的轴线在一条线上，调节“夹座”以调节顶尖上下位置，调节“支架柱”以调节顶尖左右位置。
2. 调节“右侧顶尖”使摆杆座松紧适度，顶尖与“摆杆座”的摩擦力至最小，调好后“用锁紧螺帽”固定。
3. 松开“锁紧螺钉（2）”可旋转“转动圆环”即转动光电门，锁紧“锁紧螺钉（2）”可固定光电门。

附录：多功能微秒计 DHTC-1 使用说明书

一、概述

多功能微秒计 DHTC-1 可用于单个或多个周期（最多 197 个周期）、瞬时速度等物理量的测量，采用高速光电门达到很高的响应速度和计时精度，是研究物理运动的有力工具。

二、主要技术指标

- 1、工作环境条件：温度范围 $10^{\circ}\text{C}\sim 35^{\circ}\text{C}$ ，相对湿度 25%~85%。
- 2、额定工作电源电压：AC 220V \pm 10%，50Hz，耗电 \leq 5W。
- 3、光电门响应时间 $<1\mu\text{s}$ 。
- 4、挡光针直径可小至 0.5mm。
- 5、计时分辨率 $1\mu\text{s}$ 。
- 6、计时长度 9 位。
- 7、被测周期可小至 $800\mu\text{s}$ 。
- 8、使用直径为 5mm 的挡光针可测量 10m/s 的瞬时速度。
- 9、计时误差 $<20\text{ppm}$ （来源于时间基准，所以误差具有短期稳定性）。

三、使用方法

- 1、打开电源初始界面如图 1



图 1




2、按   键设置测量周期数，按  进入测量状态，如图 2



图 2

3、计时从第一次挡光开始，截止最后一次挡光，挡一次光 C：加 1，直到满设定值，显示测量结果如图 3



图 3

4、重新进入测周期则重复步骤 2

5、测速度则按  进入测脉冲宽度状态，如图 4



图 4

6、当挡光针经过光电门，计时器计出挡光针挡住光的时间，测量出挡光路径就可以计算出瞬时速度（注意：使用长度测量工具测量挡光针直径精度有限；挡住光多少时光电门进入响应，不同的光电门由于器件的不完全一致性也有所不同；接收光的圆形小孔的规则程度有限。以上因素都影响我们计算实际挡光路径，但是以上因素对于每台光电门都具有短期稳定性，建议使用表面光滑的圆柱状挡光针）。测量完成，显示测量结果如图 5



图 5

7、重新进入测速度重复步骤 5

8、按  或  键转到测周期状态

实验八：旋转液体综合实验

一、实验背景、

在力学创建之初，牛顿的水桶实验就发现，当水桶中的水旋转时，水会沿着桶壁上升。旋转的液体其表面形状为一个抛物面，可利用这点测量重力加速度；旋转液体的抛物面也是一个很好的光学元件。美国的物理学家乌德创造了液体镜面，他在一个大容器里旋转水银，得到一个理想的抛物面，由于水银能很好地反射光线，所以能起反射镜的作用。

随着现代技术的发展液体镜头正在向“一大”“一小”两个极端发展：

“大”可以作为大型天文望远镜的镜头：反射式液体镜头已经在大型望远镜中得到了应用，代替传统望远镜中使用的玻璃反射镜。当盛满液体（通常采用水银）的容器旋转时，向心力会产生一个光滑的用于望远镜的反射凹面镜。通常这样一个光滑的曲面，完全可替代需大量复杂工艺并且价格昂贵的玻璃镜头，哈勃望远镜的失败也让我们深刻了解了玻璃镜头是何等脆弱。

“小”则可以作为拍照手机的变焦镜头。美国加利福尼亚大学的科学家发明了液体镜头，它通过改变厚度仅为8mm的两种不同的液体交接处月牙形表面的形状，实现焦距的变化。这种液体镜头相对于传统的变焦系统而言，兼顾了紧凑的结构和低成本两方面的优势。

旋转液体的综合实验可利用抛物面的参数与重力加速度关系，测量重力加速度，另外，液面凹面镜成像与转速的关系也可研究凹面镜焦距的变化情况。还可通过旋转液体研究牛顿流体力学，分析流层之间的运动，测量液体的粘滞系数等。

二、实验原理

1. 旋转液体抛物面公式推导：

定量计算时，选取随圆柱形容器旋转的参考系，这是一个转动的非惯性参考系。液体相对于参考系静止，任选一小块液体P，其受力如图1。 F_i 为沿径向向外的惯性离心力， mg 为重力， N 为这一小块液体周围液体对它的作用力的合力，由对称性可知， N 必然垂直于液体表面。在 $X-Y$ 坐标下 $P(x, y)$ 则有：

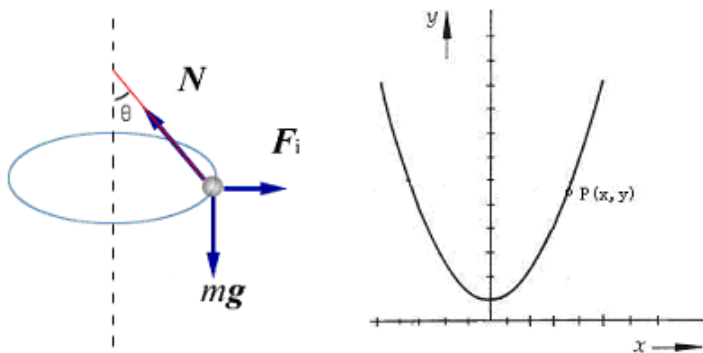


图1 实验原理图

$$N \cdot \cos\theta - mg = 0$$

$$N \cdot \sin\theta - F_i = 0$$

$$F_i = m \cdot \omega^2 \cdot x$$

$$\tan\theta = \frac{dy}{dx} = \frac{\omega^2 \cdot x}{g}$$

根据图1有：

$$y = \frac{\omega^2}{2g} \cdot x^2 + y_0 \quad (1)$$

ω 为旋转角速度， y_0 为 $x=0$ 处的 y 值。此为抛物线方程，可见液面为旋转抛物面。

2. 用旋转液体测量重力加速度 g :

在实验系统中，一个盛有液体半径为 R 的圆柱形容器绕该圆柱体的对称轴以角速度 ω 匀速稳定转动时，液体的表面形成抛物面，如图2。

设液体未旋转时液面高度为 h ，液体的体积为：

$$V = \pi R^2 \cdot h \quad (2)$$

因液体旋转前后体积保持不变，旋转时液体体积可表示为：

$$V = \int_0^R y \cdot (2\pi \cdot x) \cdot dx = 2\pi \int \left(\frac{\omega^2 \cdot x^2}{2g} + y_0 \right) \cdot x dx \quad (3)$$

由 (2)、(3) 式得：

$$y_0 = h - \frac{\omega^2 \cdot R^2}{4g} \quad (4)$$

联立 (1)、(4) 可得，当 $x = x_0 = R/\sqrt{2}$ 时， $y(x_0) = h$ ，即液面在 x_0 处的高度是恒定值。

方法一. 用旋转液体液面最高与最低处的高度差测量重力加速度 g ：

如图 2 所示，设旋转液面最高与最低处的高度差为 Δh ，点 $(R, y_0 + \Delta h)$ 在 (1) 式的抛物线上，

有 $y_0 + \Delta h = \frac{\omega^2 \cdot R^2}{2g} + y_0$ ，得： $g = \frac{\omega^2 \cdot R^2}{2\Delta h}$ 又 $\omega = \frac{2\pi n}{60}$ ，则：

$$g = \frac{\pi^2 \cdot D^2 \cdot n^2}{7200 \times \Delta h} \quad (5)$$

式中 D 为圆筒直径， n 为旋转速度（转/分）。

方法二. 斜率法测重力加速度：

如图 2 所示，激光束平行转轴入射，经过透明屏幕，打在 $x_0 = R/\sqrt{2}$ 的液面 A 点上，反点为 C，A 处切线与 x 方向的夹角为 θ ，则 $\angle BAC = 2\theta$ ，测出透明屏幕至圆桶底部的距离液面静止时高度 h ，以及两光点 BC 间距离 d ，

$$\tan 2\theta = \frac{d}{H - h}$$

求出 θ 值。

因为 $\tan \theta = \frac{dy}{dx} = \frac{\omega^2 \cdot x}{g}$ ，在 $x_0 = R/\sqrt{2}$ 处有 $\tan \theta = \frac{\omega^2 \cdot R}{\sqrt{2} \times g}$ 因为 $\omega = \frac{2\pi n}{60}$ ，则：

$$\tan \theta = \left(\frac{2\pi n}{60}\right)^2 \cdot \frac{R}{\sqrt{2} \times g} = \frac{4\pi^2 R \cdot n^2}{3600\sqrt{2} \times g} = \frac{2\pi^2 D \cdot n^2}{3600\sqrt{2} \times g}$$

$$g = \frac{2\pi^2 D \cdot n^2}{3600\sqrt{2} \times \tan \theta} \quad (6)$$

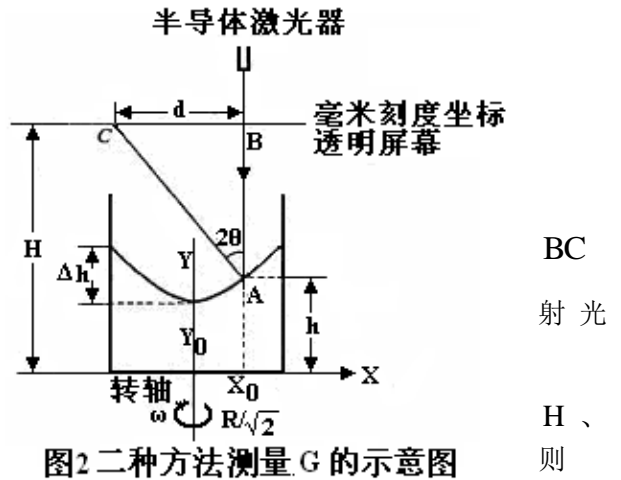


图2 二种方法测量 G 的示意图

BC
射光
H、
则

或可作 $\tan \theta \sim n^2$ 曲线，求斜率 k ，可得 $k = \frac{2\pi^2 D}{3600\sqrt{2} \times g}$ ，求出 $g = \frac{2\pi^2 D}{3600\sqrt{2} \times k}$

3. 验证抛物面焦距与转速的关系：

旋转液体表面形成的抛物面可看作一个凹面镜，符合光学成像系统的规律，若光线平行于曲面对称轴入射，反射光将全部会聚于抛物面的焦点。

根据抛物线方程 (1)，抛物面的焦距 $f = \frac{g}{2\omega^2}$ 。

4. 测量液体粘滞系数：

在旋转的液体中，沿中心放入张丝柱形物体，圆柱高度为 L ，半径为 R_1 ，外圆桶半径为 R_2 ，如图 3 所示。

外圆筒以恒定的角速度 ω_0 旋转，小的情况下，流体会很规则地一层稳定时圆柱形物体静止角速度为零。

1. 设外圆桶稳定旋转时，圆柱形物的阻力矩为 M ，则：

$$M = M_1 + M_2 \quad (\text{推导略})$$

式中 M_1 ：圆柱侧面所受液体的阻力矩， M_2 ：圆柱底面所受液体摩擦力矩

$$M_1 = 4\pi \cdot \eta \cdot L \cdot \omega_0 \cdot \frac{R_1^2 \cdot R_2^2}{R_1^2 - R_2^2} \quad (7) \quad , \quad M_2 = \frac{\pi \cdot \eta \cdot R_2^4 \cdot \omega_0}{2\Delta z} \quad (8)$$

圆柱形物体所承受的液体阻力矩 M ：

$$M = M_1 + M_2 = 4\pi \cdot \eta \cdot L \cdot \omega_0 \cdot \frac{R_1^2 \cdot R_2^2}{R_1^2 - R_2^2} + \frac{\pi \cdot \eta \cdot R_2^4 \cdot \omega_0}{2\Delta z} \quad (9)$$

2. 张丝扭转力矩 M' 。

悬挂圆柱形物体的张丝为钢丝，其切变模量为 G ，张丝半径为 R ，张丝长度为 L' 。转动力矩

$$\text{为：} M' = \frac{\pi \cdot G \cdot R^4}{2L'} \cdot \theta \quad (10) \text{ 该式表示力矩 } M' \text{ 与扭转角度 } \theta \text{ 成正比。}$$

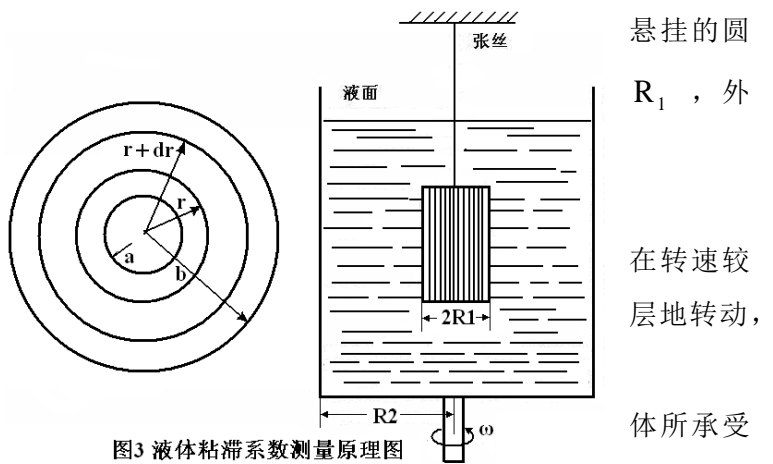


图3 液体粘滞系数测量原理图

悬挂的圆
 R_1 ，外
在转速较
层地转动，
体所承受

在液体旋转系统稳定时，液体产生的阻力矩与悬挂张丝所产生的扭转力矩平衡，使得圆柱形物体达到静止。所以 $M = M'$ ，从 (9)、(10) 式可以解出粘度系数为：

$$\eta = \frac{G \cdot R^4}{2L' \cdot \omega_0} \cdot \theta \cdot \left[\frac{2\Delta z \cdot (R_1^2 - R_2^2)}{8L \cdot \Delta z \cdot R_1^2 \cdot R_2^2 + (R_1^2 - R_2^2) \cdot R_2^4} \right] \quad (11)$$

式中：

G：金属张丝的切变模量

R：张丝半径

L'：张丝长度

θ ：偏转角度

ω_0 ：圆桶转速

Δz ：圆柱底面到外圆桶底面的距离

R_1 ：圆柱体半径，

R_2 ：圆桶内壁半径

L：

圆柱高度



三、实验仪器

1. 激光器
2. 毫米刻度水平屏幕
3. 水平标线
4. 水平仪
5. 激光器电源插孔
6. 调速开关
7. 速度显示窗
8. 圆柱形实验容器
9. 水平量角器
10. 毫米刻度垂直屏幕
11. 张丝悬挂圆柱体



12. 实验容器内径 $R/\sqrt{2}$ 刻线（见底盘色点）（可自行标注）

四、实验内容

1. 仪器调整：

- ① 水平调整
- ② 激光器位置调整

2. 测量重力加速度 g ：

- ① 用旋转液体液面最高与最低处的高度差测量重力加速度 g ：

改变圆桶转速 n （转/秒）（ $\omega = 2\pi n$ ）6次，测量液面最高与最低处的高度差，计算重力加速度 g 。

- ② 斜率法测重力加速度：

将透明屏幕（1）置于圆桶上方，用自准直法调整激光束平行转轴入射，经过透明屏幕，对准桶底 $x_0 = R/\sqrt{2}$ 处的记号，测出透明屏幕至圆筒底部的距离 H 、液面静止时高度 h 。

改变圆桶转速 n （转/分）（ $\omega = \frac{2\pi n}{60}$ ）6次，在透明屏幕上读

出入射光与反射光点 BC 间距离 d ，则 $\tan 2\theta = \frac{d}{H-h}$ ，求出

$\tan \theta$ 值。

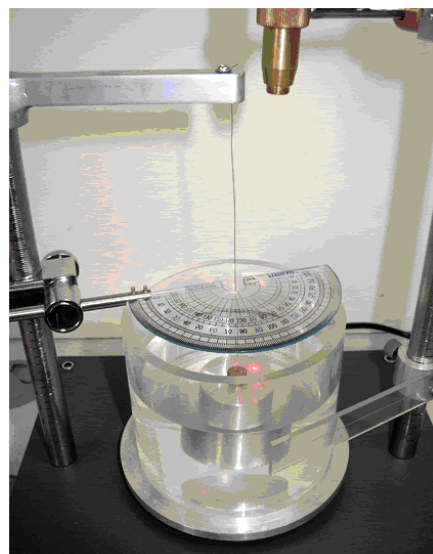
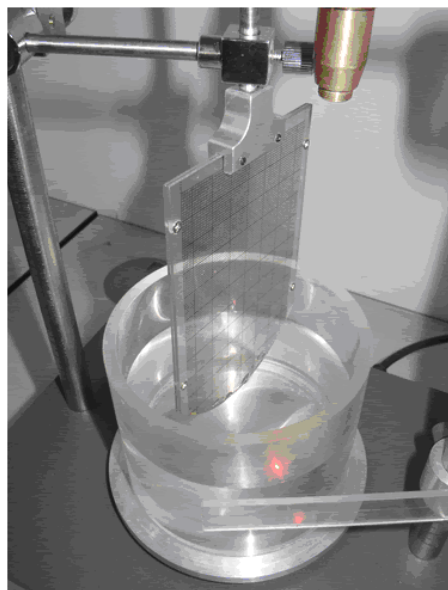
3. 验证抛物面焦距与转速的关系：

将毫米刻度垂直屏幕过转轴放入实验容器中央，激光束平行转轴入射至液面，后聚焦在屏幕上，可改变入射位置观察聚焦情况。

改变圆桶转速 n （转/分）（ $\omega = \frac{2\pi n}{60}$ ）6次，记录焦点位置。

4. 研究旋转液体表面成像规律：

给激光器装上有箭头状光阑的帽盖，使其光束略有发散且在屏幕上成箭头状像。光束平行光轴在偏离光轴处射向旋转液体，经液面反射后，在水平屏幕上也留下了箭头。固定转速，上下移动屏幕的位置，观察像箭头的方向及大小变化。实验发现，屏幕



在较低处时，入射光和反射光留下的箭头方向相同，随着屏幕逐渐上移，反射光留下的箭头越来越小直至成一光点，随后箭头反向且逐渐变大。也可以固定屏幕，改变转速 n ，将会观察到类似的现象。

5. 测量液体粘滞系数：

装好实验装置、将张丝悬挂的圆柱体垂直置于液体中心，在柱体上表面画一刻度线记号，读出该刻度线对准量角器的相应位置。低速旋转液体，稳定后柱面上刻度线偏一角度，用激光器和量角器测出偏转角。同一转速测三次，改变转速 3 次，反复读取读数。

1. G 金属张丝的切变模量测量
2. R ：张丝半径
3. L ：张丝长度
4. Δz ：圆柱底面到外圆桶底面的距离
5. L ：圆柱高度
6. R_1 ：圆柱体半径，
7. R_2 ：圆桶容器半径

五、数据处理

1. 测量重力加速度 g ：

方法一：

次数	1	2	3	4	5	6
转速 n (转/分)	110	115	120	125	130	135
高度差 Δh (cm)	1.70	1.80	1.90	2.10	2.20	2.4
g (cm/s^2)	936.08	966.28	996.75	978.54	1010.28	998.70

$\bar{g} = 981.11(cm/s^2)$ 济南地区重力加速度公认值： $g = 979.88cm/s^2$

实验相对误差：
$$E = \frac{|981.11 - 979.88|}{979.88} \times 100\% = 0.1255\%$$

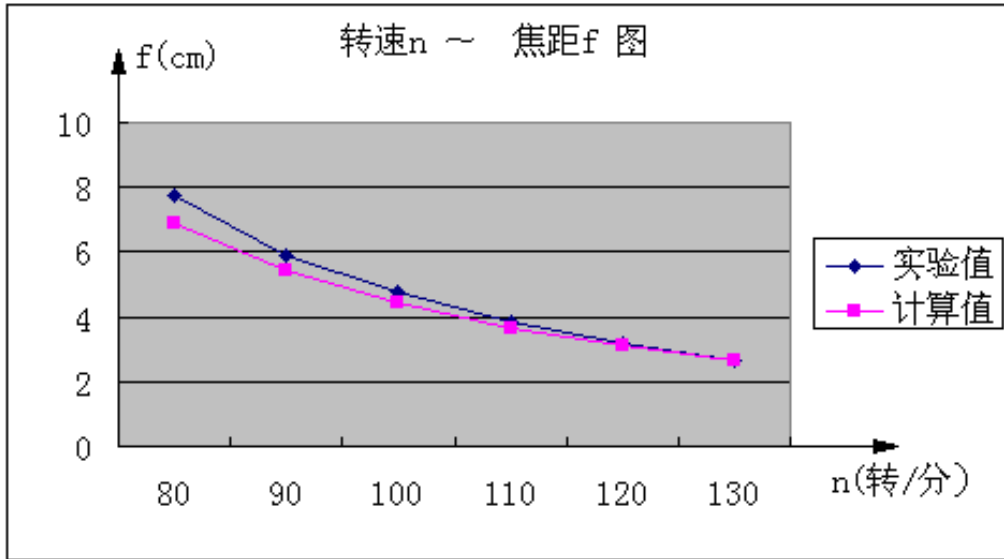
方法二：屏幕高度 $H = 13.0\text{cm}$ ，液面高度 $h = 5.5\text{cm}$

次数	1	2	3	4	5	6
转速 n (转/分)	40	50	60	70	80	90
BC 间距离 d (mm)	10.5	15.5	22.5	30.0	40.5	52.5
$\tan 2\theta = \frac{d}{H-h}$	0.14	0.21	0.30	0.40	0.54	0.70
θ	3.985	5.838	8.350	10.901	14.185	17.496
$\tan \theta$	0.06964	0.10224 6	0.14677 6	0.19258 8	0.25276 0	0.31522
g (cm/s^2)	872.621	929.13	932.04	966.67	962.02	976.295

$\bar{g} = 939.80$ (cm/s^2) 相对误差：
$$E = \frac{|939.80 - 979.30|}{979.30} \times 100\% = 4.0\%$$

2. 验证抛物面焦距与转速的关系：

测量次数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
转速 n (转/分)	60	65	70	75	80	85	90	95	100	105	110	115
所测焦距 f	9.35	8.15	7.24	6.21	5.50	5.10	4.6	4.2	3.8	3.4	3.1	2.9



3. 测量液体粘滞系数：

蓖麻油， $T = 18^{\circ}\text{C}$

次数	1			2			3		
转速 n (转/分)	39			46			50		
偏转角 θ°	329	326	326	377	376	376	421	417	413
$\bar{\theta}^{\circ}$	327			376.3			417		
η (Pas)	1.31837			1.28638			1.31136		

$\bar{\eta} = 1.30537\text{Pas}$ 根据经验公式 $\eta = 5.75e^{-0.0837t}$ [1] 得 $\eta = 1.27455\text{Pas}$

实验相对误差： $E = \frac{|1.30537 - 1.27455|}{1.27455} \times 100\% = 2.4\%$

$G = 81\text{GPa}$ 金属张丝的切变模量

$R = 0.12125\text{mm}$ 张丝半径

$L' = 30.0\text{cm}$	张丝长度
θ	为偏转角度
ω_0	圆桶转速
$\Delta z = 2.3\text{cm}$	圆柱底面到外圆桶底面的距离
$L = 3.0\text{cm}$	圆柱高度
$R_1 = 1.5\text{cm}$	圆柱半径
$R_2 = 4.9\text{cm}$	为外圆桶半径

实验九：液体电导率测量

一、实验背景、

FD-LCM-A 液体电导率测量实验仪是一种物理思想极其丰富，实验方法巧妙，实验动手能力训练内容多，并有实际应用价值的基础物理实验教学仪器。本仪器可用于基础物理实验、设计性与研究性物理实验，也可以用于测量液体电导率的科学研究。

组成仪器的核心为一组中空互感式液体电导率测量传感器，其内部由二个纳米材料高导磁率铁基合金环的电感线圈组成。该传感器通低频正弦交流电，且感应电极不与待测液体接触，因此传感器周围无极化现象产生。由这种互感式传感器组成的电导率测量仪，可精确地测量液体的电导率。用这种原理制成的液体电导率自动测量仪已在石油、化工等领域广泛用于各种混合物液体如泥浆水等的电导率的测量。

二、实验目的

1. 了解和演示该互感式液体电导率传感器的工作原理，测量传感器放入液体中时，传感器输出电压与液体电导率的关系，帮助学生深刻理解法拉第电磁感应定律、欧姆定律和互感器原理等重要物理概念与规律。
2. 用精密标准电阻对互感式液体电导率传感器进行定标。
3. 测量室温时盐水饱和溶液的电导率。
4. 测量盐水溶液电导率与温度关系曲线。（选做）

三、实验原理

FD-LCM-A 液体电导率测量实验仪测量液体的电导率采用一种中空互感式液体电导率测量传感器。传感器内部由二个纳米材料铁基合金环的电感线圈组成，每环各绕一组线圈，两组线圈匝数相同，其结构示意图如图 1 所示

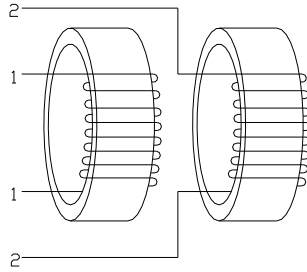


图 1 电导率测量传感器结构图

这种传感器的工作原理是：由信号发生器输出的交变电流在线圈（1，1）环内产生交变磁场，该磁场在导电液体中产生交变的感生电流，由于液体中的感生电流使同在液体中的线圈（2，2）环内产生交变磁场，该磁场在线圈（2，2）内又产生感生电动势，成为传感器的输出信号。

改变液体的电导率（ σ ），在相同的输入幅度（ V_{in} ）条件下，感生电流会发生变化，导致传感器的输出信号电压（ V_{out} ）的变化。可以证明，液体的电导率在一定的 V_{in} 范围内， σ 与 V_{out} 成正比，所以可以写成：

$$\sigma = K(V_{out} / V_{in}) \quad (1)$$

在测量中，称（ V_{out} / V_{in} ）为“电压衰减”，所以在某一确定输入幅度的驱动下，电导率与电压衰减成正比。

在测量装置中，盛放待测液体的容器很大， V_{out} 的大小主要与传感器的中空圆柱体的液体（简称液体柱）有关，可从液体柱来计算液体的电导率。传感器的液体柱电阻与固体电阻相当，所以：

$$\begin{aligned} R &= \rho \frac{L}{S} = \frac{1}{\sigma} \frac{L}{S} \\ \sigma &= \frac{1}{R} \frac{L}{S} \end{aligned} \quad (2)$$

比较（1）和（2）可得：

$$V_{out} / V_{in} = \frac{1}{K} \frac{L}{S} \frac{1}{R} = B \frac{1}{R} \quad (3)$$

式（3）中： $B = \frac{1}{K} \frac{L}{S}$ ，也可写成： $K = \frac{1}{B} \frac{L}{S}$ 。代入（1）可得到：

$$\sigma = \left(\frac{1}{B} \frac{L}{S} \right) V_{out} / V_{in} \quad (4)$$

说明用此传感器测液体电导率时，与它的中空圆柱体长度（L），截面积（S），电压衰减（ V_{out}/V_{in} ）和比例常数（B）有关。而“外面”的液体，因为等效的 S 很大，R 很小。所以，液体中的感生电流主要由中空圆柱体内的液体住的阻值限定。

需要注意的是：在实验中，为了多点定标比例常数（B），需要配备多种标准的 σ 液体，这样操作既费时又困难。因此根据上面的原理，用电阻回路也称为“校核标准”（R）来代替标准 σ 的液体使实验方便准确。

“校核标准”的结构就是将标准电阻替代液体住，短接标准电阻两端，成为电阻回路。需要注意的是电阻回路的一部分必须从传感器中空圆柱体内穿过。

实验证明，“校核标准”和实际盐水配置的标准结果，误差不大于 10^{-3} 量级。加上标准液体的电导率对温度较敏感，所以实际应用都不用标准盐水进行定标。

四、实验仪器

FD-LCM-A 液体电导率测量实验仪（含频率为 2500Hz 的实验信号源；中空互感式液体电导率测量传感器；一组高精度系列电阻；三位半数字交流电压表；1000ml 实验量杯及实验连接线；食盐 100 克和自来水 700ml）。仪器由一组频率为 2500Hz 的实验信号源；二个纳米材料高导磁率铁基合金环的电感线圈组成的电导率测量传感器；一组高精度系列电阻；三位半数字交流电压表；500ml 实验量杯及实验连接线等组成。如图 1 所示。



图 1 液体电导率测量实验仪装置

五、实验内容

1. 图 2 为液体电导率测量的实验连接图。为了保证测量的准确性，实验必须利用选择开关，使测量传感器输入电压 (V_{in}) 和输出电压 (V_{out}) 能快速转换，并在同一个数字电压表上显示。定标时将外接标准电阻来代替液体。如图 3 所示，将一根导线穿过传感器的中空圆柱体，接在标准电阻的两端成为电阻回路。

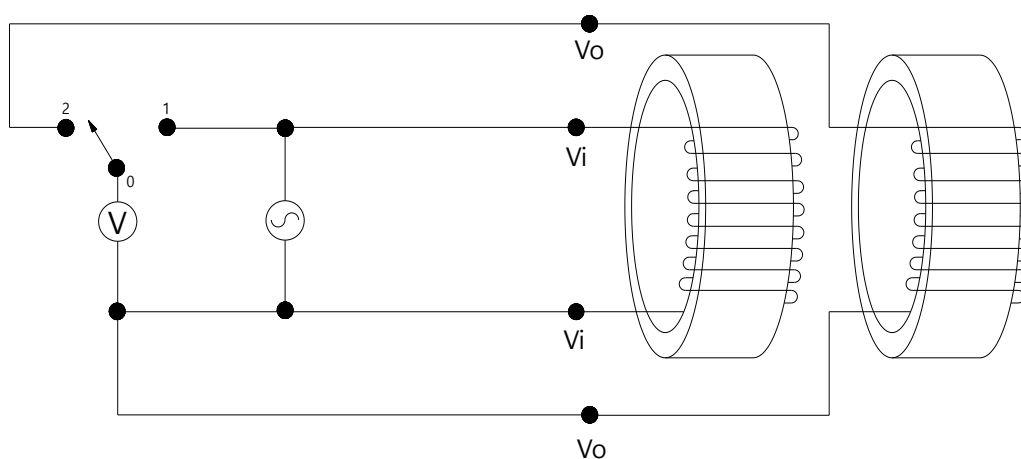


图 2 液体电导率测量实验连线图

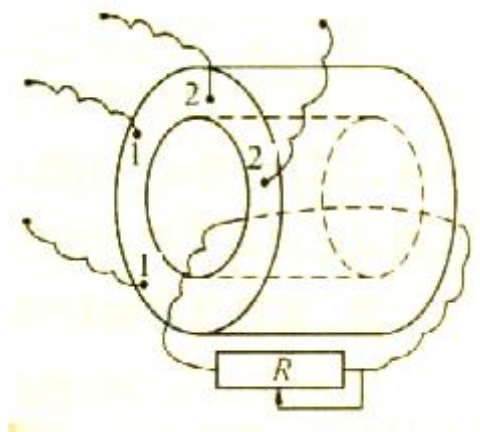


图 3 定标接线示意图

2. 根据“校核标准”范围: $[0.00—9.50] \Omega$, 测量不同“校核标准”(不能少于 20 点)时的 (V_{out}/V_{in}) 值, 记录在数据表格内。测量时注意随时调节 (V_{in}) 的幅度, 在整个测量过程中 (V_{in}) 保持不变。

3. 测量传感器的有关尺寸, 计算 $K = \frac{1}{B} \frac{L}{S}$ 值, 写出用本仪器测量液体电导率的计算公式和相对不确定度公式。

4. 取电压衰减 (V_{out}/V_{in}) 为纵坐标; 取液体柱的倒数 ($1/R$) 为横坐标作图 (不少于 20 点)。可以看出传感器感生电流在某一范围内是线性的。写出 (V_{out}/V_{in}) 与 ($1/R$) 线性关系式。计算平均

斜率值 (定义为: $A_B = \frac{1}{2}(B_{max} + B_{min})$), 和斜率的相对误差 (定义为:

$$E_B = \frac{B_{max} - B_{min}}{B_{max} + B_{min}} \times 100\%) \text{ (式中的 } B_{max} \text{ 和 } B_{min} \text{ 分别为斜率的最大可能值和最小可能值)}。$$

5. 测量常温下饱和盐水溶液的电导率, 写出结果。

【实验数据】

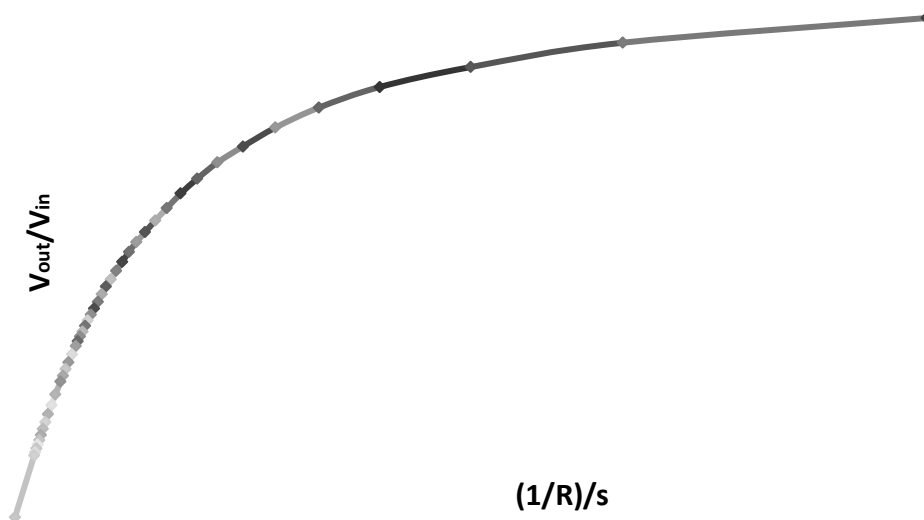
*所有实验数据与每台仪器参数、实验室环境温度、盐水溶液温度等有关, 仅供参考。

(1) $V_{out}/V_{in}-1/R$ 关系测量 (29°C)

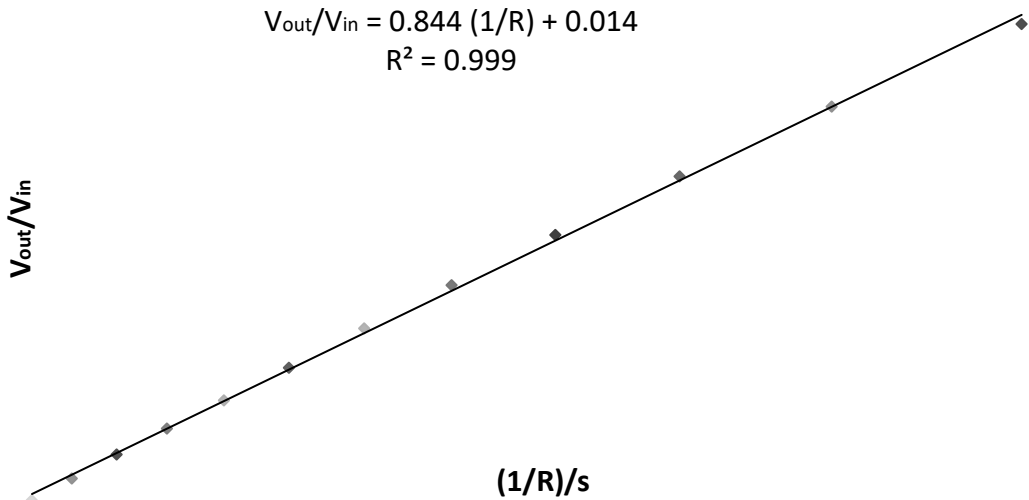
R/Ω	V_{in}/V	V_{out}/V	$(1/R)/s$	V_{out}/V_{in}
0.20	1.805	1.476	5.000	0.818
0.30	1.805	1.403	3.333	0.777
0.40	1.805	1.331	2.500	0.737
0.50	1.805	1.272	2.000	0.705
0.60	1.805	1.211	1.667	0.671
0.70	1.805	1.152	1.429	0.638
0.80	1.805	1.096	1.250	0.607
0.90	1.805	1.049	1.111	0.581
1.00	1.805	1.001	1.000	0.555
1.10	1.805	0.957	0.909	0.530
1.20	1.805	0.914	0.833	0.506
1.30	1.805	0.877	0.769	0.486
1.40	1.805	0.843	0.714	0.467
1.50	1.805	0.814	0.667	0.451
1.60	1.805	0.784	0.625	0.434
1.70	1.805	0.755	0.588	0.418
1.80	1.805	0.728	0.556	0.403
1.90	1.805	0.703	0.526	0.389
2.00	1.805	0.682	0.500	0.378
2.10	1.805	0.659	0.476	0.365
2.20	1.805	0.637	0.455	0.353
2.30	1.805	0.617	0.435	0.342

2.40	1.805	0.599	0.417	0.332
2.50	1.805	0.582	0.400	0.322
2.60	1.805	0.566	0.385	0.314
2.70	1.805	0.549	0.370	0.304
2.80	1.805	0.534	0.357	0.296
2.90	1.805	0.520	0.345	0.288
3.00	1.805	0.506	0.333	0.280
3.20	1.805	0.481	0.313	0.266
3.40	1.805	0.458	0.294	0.254
3.60	1.805	0.438	0.278	0.243
3.80	1.805	0.418	0.263	0.232
R/Ω	V_{in}/V	V_{out}/V	(1/R)/s	V_{out}/V_{in}
4.00	1.805	0.401	0.250	0.222
4.50	1.805	0.363	0.222	0.201
5.00	1.805	0.331	0.200	0.183
5.50	1.805	0.304	0.182	0.168
6.00	1.805	0.281	0.167	0.156
6.50	1.805	0.261	0.154	0.145
7.00	1.805	0.243	0.143	0.135
7.50	1.805	0.228	0.133	0.126
8.00	1.805	0.215	0.125	0.119
8.50	1.805	0.203	0.118	0.112
9.00	1.805	0.192	0.111	0.106
9.50	1.805	0.182	0.105	0.101

(2) 作 $V_{out}/V_{in}-1/R$ 关系图 ($1/R$ 由 0—5S 范围)



(3) 取 $V_{out}/V_{in}-1/R$ 作直线图 ($1/R$ 由 0—0.25S 范围)



(4) K 值计算

传感器实际: $L=30.16\text{mm}$, $d=13.50\text{mm}$, 即 $S=\pi(\frac{1}{2}d)^2=143.07\text{mm}^2$, 又 $B=0.844\ \Omega$

$$K = \frac{1}{B} \frac{L}{S} = 0.250\text{s/mm}$$

(5) 测量饱和盐水的电导率

① 盐水温度 35.6°C ; $V_{out}=0.125\text{V}$

$$\sigma = (\frac{1}{B} \frac{L}{S}) V_{out} / V_{in} = 0.250 * 0.125 / 1.805 = 0.0173\ \text{s/mm} = 17.3\ \text{s/m}$$

② 盐水温度 40°C ; $V_{out}=0.141\text{V}$

$$\sigma = (\frac{1}{B} \frac{L}{S}) V_{out} / V_{in} = 0.250 * 0.141 / 1.805 = 0.0195\ \text{s/mm} = 19.5\ \text{s/m}$$

③ 盐水温度 45°C ; $V_{out}=0.149\text{V}$

$$\sigma = (\frac{1}{B} \frac{L}{S}) V_{out} / V_{in} = 0.250 * 0.149 / 1.805 = 0.0206\ \text{s/mm} = 20.6\ \text{s/m}$$

④ 盐水温度 50°C ; $V_{out}=0.159\text{V}$

$$\sigma = (\frac{1}{B} \frac{L}{S}) V_{out} / V_{in} = 0.250 * 0.159 / 1.805 = 0.0220\ \text{s/mm} = 22.0\ \text{s/m}$$

⑤ 盐水温度 55°C ; $V_{out}=0.175\text{V}$

$$\sigma = \left(\frac{1}{B S}\right) V_{out} / V_{in} = 0.250 * 0.175 / 1.805 = 0.0242 \text{ s/mm} = 24.2 \text{ s/m}$$

六、注意事项

1. 本仪器开启电源后请预热 10 分钟左右, 待输出信号稳定后才能开始做实验, 为了方便实验, 增加了选择开关, 按规定连线后, 就能拨动选择开关来测量传感器的 (I) 组或 (II) 组的电压 (仪器面板上连线插座为测量共同端)。

2. 测量盐水饱和溶液在某一温度时的电导率, 须将盐水混合搅拌, 使盐充分溶解后在测量。

3. 实验用传感器应稳拿轻放, 不可以掉地, 撞击。

4. 实验完成后, 必须将传感器冲洗干净, 并用清洁干纱布擦干。

5. 实验时传感器初级电压通常取 1.7V-1.9V, 其中任一点电压均可做实验。

实验十：光敏传感器的光电特性研究

(FB815型光敏传感器光电特性实验仪)

凡是将光信号转换为电信号的传感器称为光敏传感器，也称为光电式传感器，它可用于检测直接由光照明度变化引起的非电量，如光强、光照度等；也可间接用来检测能转换成光量变化的其它非电量，如零件直径、表面粗糙度、位移、速度、加速度及物体形状、工作状态识别等。光敏传感器具有非接触、响应快、性能可靠等特点，因而在工业自动化控制及智能机器人中得到广泛应用。

光敏传感器的物理基础是光电效应，通常分为外光电效应和内光电效应两大类，在光辐射作用下电子逸出材料的表面，产生光电子发射现象，则称为外光电效应或光电子发射效应。基于这种效应的光电器件有光电管、光电倍增管等。另一种现象是电子并不逸出材料表面的，则称为内光电效应。光电导效应、光生伏特效应都是属于内光电效应。好多半导体材料的很多电学特性都因受到光的照射而发生变化。因此也是属于内光电效应范畴，本实验所涉及的光敏电阻、光敏二极管等均是内光电效应传感器。

通过本设计性实验可以帮助学生了解光敏电阻、光敏二极管的光电传感特性及在某些领域中的应用。

【实验原理】

1. 光电效应：

(1) 光电导效应：

当光照射到某些半导体材料上时，透过到材料内部的光子能量足够大，某些电子吸收光子的能量，从原来的束缚态变成导电的自由态，这时在外电场的作用下，流过半导体的电流会增大，即半导体的电导会增大，这种现象叫光电导效应。它是一种内光电效应。

光电导效应可分为本征型和杂质型两类。前者是指能量足够大的光子使电子离开价带跃入导带，价带中由于电子离开而产生空穴，在外电场作用下，电子和空穴参与电导，使电导增加。杂质型光电导效应则是能量足够大的光子使施主能级中的电子或受主能级中的空穴跃迁到导带或价带，从而使电导增加。杂质型光电导的长波限比本征型光电导的要长的多。

(2) 光生伏特效应：

在无光照时，半导体PN结内部有自建电场。当光照射在PN结及其附近时，在能量足够大的光子作用下，在结区及其附近就产生少数载流子（电子、空穴对）。载流子在结区外时，靠扩散进入结区；在结区中时，则因电场E的作用，电子漂移到N区，空穴漂移到P区。结果使N区带负电荷，P区带正电荷，产生附加电动势，此电动势称为光生电动势，此现象称为光生伏特效应。

2. 光敏传感器的基本特性：

光敏传感器的基本特性则包括：伏安特性、光照特性等。

伏安特性：光敏传感器在一定的入射光照度下，光敏元件的电流I与所加电压U之间的关系称为光敏器件的伏安特性。改变照度则可以得到一族伏安特性曲线。它是传感器应用设计时的重要依据。

掌握光敏传感器基本特性的测量方法，为合理应用光敏传感器打好基础。本实验主要是研究光敏电阻、光敏二极管的基本特性。

(1) 光敏电阻：

利用具有光电导效应的半导体材料制成的光敏传感器称为光敏电阻。目前光敏电阻应用的极为广泛，其工作过程为，当光敏电阻受到光照时，发生内光电效应，光敏电阻电导率的改变量为：

$$\Delta\sigma = \Delta p \cdot e \cdot \mu_p + \Delta n \cdot e \cdot \mu_n \quad (1)$$

在(1)式中， e 为电子电荷量， Δp 为空穴浓度的改变量， Δn 为电子浓度的改变量， μ 表示迁移率。当两端加上电压 U 后，光电流为：

$$I_{ph} = \frac{A}{d} \cdot \Delta\sigma \cdot U \quad (2)$$

式中 A 为与电流垂直的表面积， d 为电极间的间距。在一定的光照度下， $\Delta\sigma$ 为恒定的值，因而光电流和电压成线性关系。光敏电阻的伏安特性如图5a所示，不同的光强以得到不同的伏安特性，表明电阻值随光照度发生变化。光照度不变的情况下，电压越高，光电流也越大，而且没有饱和现象。当然，与一般电阻一样光敏电阻的工作电压和电流都不能超过规定的最高额定值。

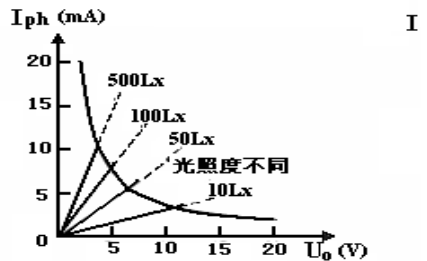


图5a 光敏电阻的伏安特性曲线

(2) 光敏二极管：

光敏二极管的伏安特性相当于向下平移了的普通二

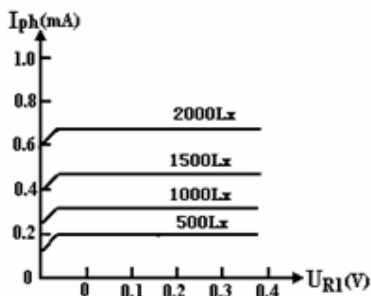


图7a 光敏二极管的伏安特性曲线

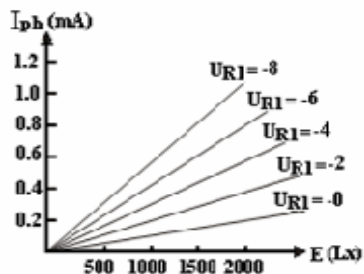


图7c 光敏二极管的光照特性曲线

极管，如图7a所示。零偏压时，光敏二极管有光电流输出。光敏二极管的光照特性亦呈良好线性，如图7c。光敏二极管的电流灵敏度一般为常数。一般在作线性检测元件时，选择光敏二极管。

实验（一）光敏电阻的伏安特性测试

【实验目的】

1. 了解内光效应。
2. 通过实验掌握光敏电阻工作原理。
3. 了解光敏电阻的基本特性，测出它的伏安特性曲线。

【实验仪器】

FB815型光敏传感器光电特性设计性实验仪，万用电表一只，导线若干。

【实验步骤】

1. 按实验仪面板示意图8接好实验线路，光源用标准钨丝灯。将检测用光敏电阻装入待测点，连接+2V~+12V电源，光源电压0~12V电源(可调)。

2. 先将可调光源调至一定的光照度，每次在一定的光照条件下，测出电源电压为：

+2V, +4V, +6V, +8V, +10V, +12V 时电

阻 R_1 两端的电压 U_R ，从而得到6个光电流数据

$$I_{ph} = \frac{U_R}{1.00k\Omega}$$
，同时算出此时光敏电阻的阻值，

即 $R_g = \frac{U_{cc} - U_R}{I_{ph}}$ 。以后调节相对光强重复上述实验(要求至少在三个不同照度下重复以上实验，

光照度大小参见后面的光照度表)。

3. 根据实验数据画出光敏电阻的一族伏安特性曲线。

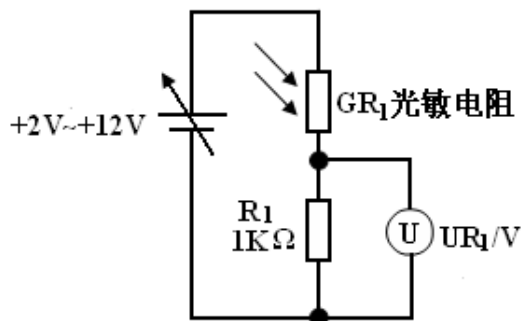


图 8 光敏电阻的伏安特性测量电路

表 1 光敏电阻伏安特性测试数据表 (照度: 173Lux)

电源电压 (V)	2	4	6	8	10	12
R_1 电压 U_{R1} (V)						
光电流 I_{ph} (A)						
光敏电压 U_0 (V)						
光敏电阻 R_g (Ω)						

表 2 光敏电阻伏安特性测试数据表（照度：861Lux）

电源电压 (V)	2	4	6	8	10	12
R _i 电压 U _{R1} (V)						
光电流 I _{ph} (A)						
光敏电压 U ₀ (V)						
光敏电阻 R _g (Ω)						

表 3 光敏电阻伏安特性测试数据表（照度：2350Lux）

电源电压 (V)	2	4	6	8	10	12
R _i 电压 U _{R1} (V)						
光电流 I _{ph} (A)						
光敏电压 U ₀ (V)						
光敏电阻 R _g (Ω)						

实验（二）光敏二极管的光照度特性测试

【实验目的】

1. 了解光敏二极管的工作原理。
2. 了解硅光敏二极管的基本特性，并测出它的光照特性曲线。

【实验仪器】

FB815 型光敏传感器光电特性设计性实验仪，万用电表一只，导线若干。

【实验步骤】

1. 按实验仪面板示意图 1 0 接好实验线路。
2. 选择一定的偏压，每次在一定的偏压下测出光敏二极管在相对光照度为“弱光”到逐步增强的光电流数据，其中 $I_{ph} = \frac{U_R}{1.00k\Omega}$ （1.00kΩ 为取样电阻）。这里要求至少测出 3 个不同的反偏电压下的数据。
3. 根据实验数据画出光敏二极管的一族光照特性曲线。

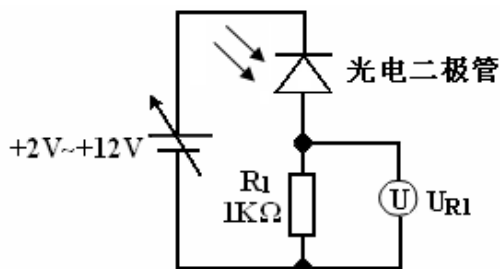


图10光敏二极管伏安特性测试电路图

表 1 光敏二极管光照特性测试数据表（电压：-4V）

照度 (Lux)	1.1	30.5	173	328	548	861	1258	1774	2350
U_R (V)									
光电流 (A)									

表 2 光敏二极管光照特性测试数据表（电压：-8V）

照度 (Lux)	1.1	30.5	173	328	548	861	1258	1774	2350
U_R (V)									
光电流 (A)									

表 3 光敏二极管光照特性测试数据表（电压：-12V）

照度 (Lux)	1.1	30.5	173	328	548	861	1258	1774	2350
U_R (V)									
光电流 (A)									

FB815型光敏传感器光电特性设计性实验仪，其结构如图1所示。

该实验仪由光敏电阻、光敏二极管、光敏三极管、硅光电池四种光敏传感器及可调电源、电阻



图1 FB815型光敏传感器光电特性实验仪实物照片

箱（自备）、数字万用表，九孔接线板与光学暗箱所组成。具体介绍如下。

1. 光学暗箱(见图 2)：

光学暗箱的大小为 $360 \times 280 \times 110 \text{mm}^3$ ，中间位置是九孔实验板，学生可以在上面按自己的需要搭建实验电路，在箱子的左里边有编号 L_1, L_2, \dots, L_8 的接线孔，从里面直接连到箱子左侧的外面，实验时将外用电源，测量万用表及变阻箱通过不同的接线口接入箱里的实验电路，当箱子密封

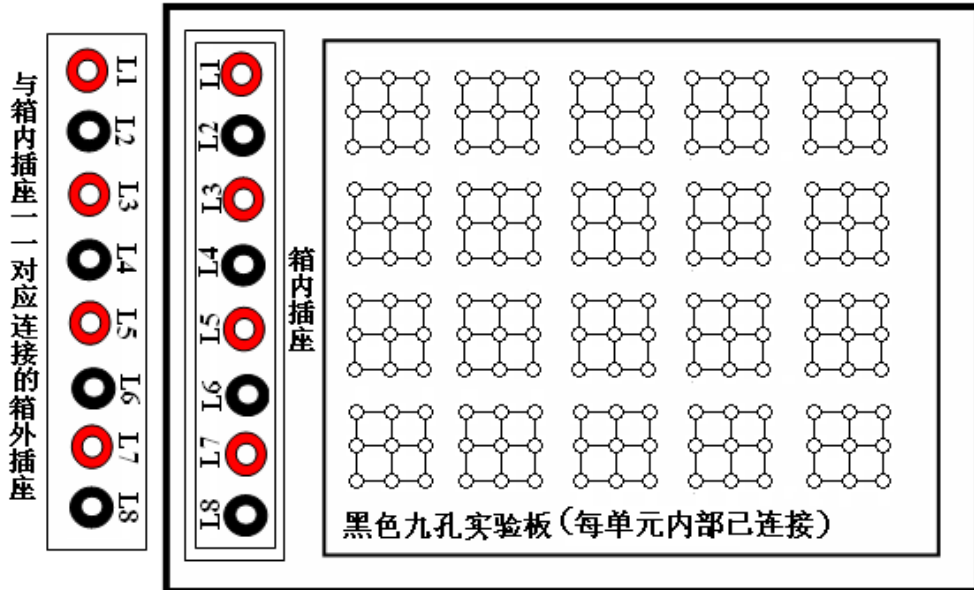
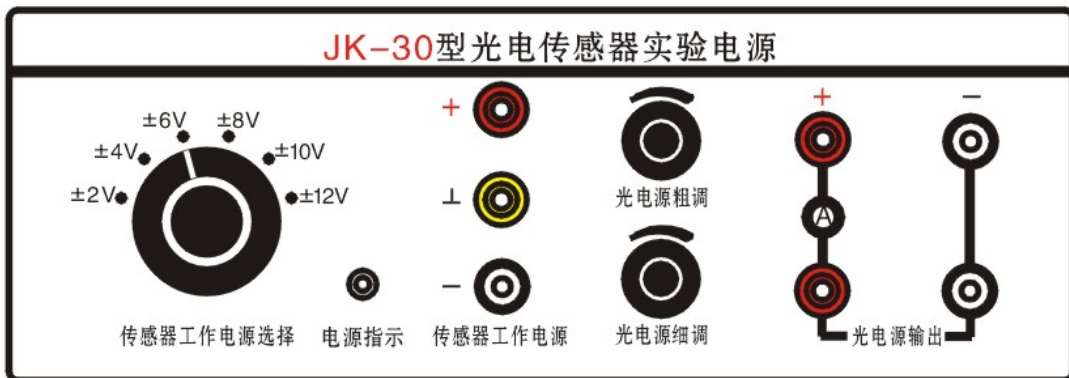


图2 实验暗箱结构图

以后，里面就与外界完全隔绝，工作时照明光路是置于暗箱中进行，从而消除杂散光对实验的影响。图2是暗箱分布示意图。

2. JK--30工作电源(见图3):



因为内部接有一欧姆电阻，所以(A)符号两端测量到的电压“V”值即是输出电流“A”值

图3 FB815型光敏传感器光电特性实验仪专用电源

本实验仪配有JK--30工作电源，图3为专用电源面板功能分布图。主要提供两路工作电压，一路光电源输出，供白帜灯发光，电压 $0 \sim 12\text{V}$ 可变，另一路传感器工作电源，有 $\pm 2\text{V}, \pm 4\text{V}, \pm 6\text{V}, \pm 8\text{V}, \pm 10\text{V}, \pm 12\text{V}$ 等量值变化，以保证实验的不同需要。光敏传感器的照度可以通过调节可调光源的电压或改变光源与传感器之间的距离来调节。

3. 其他实验配件(见图 4):

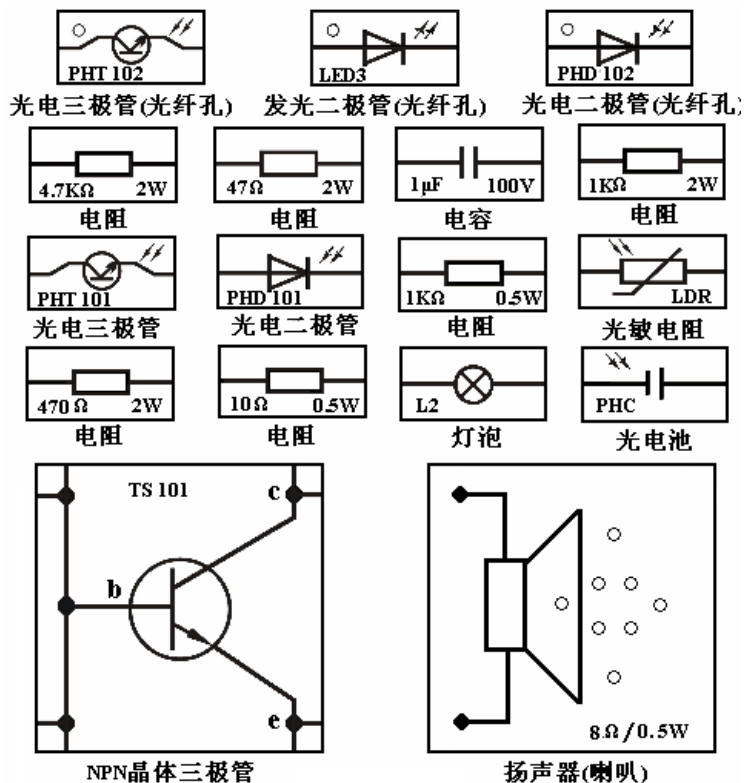


图4 FB815 型仪器元件图

【附录 1】FB815 光敏传感器光电特性实验仪相对照度 (Lux) 参考表

距离(cm) \ 电压	5	6	7	8	9	10
12	2350	1950	1700	1530	1400	1300
11	1774	1459	1280	1156	1052	980
10	1258	1059	923	825	756	704
9	861	729	632	567	519	480
8	548	469	411	368	338	315
7	328	286	249	224	206	191
6	173	158	138	123	113	105
5	80.2	73.7	64.4	57.8	52.6	48.9
4	30.5	28.2	24.6	22.1	20.2	18.8
3	8.9	7.8	6.8	6.1	5.6	5.3
2.5	3.3	3	2.7	2.4	2.2	2
2	1.1	0.9	0.7	0.6		

【附录 2】九孔实验板插孔距离参考

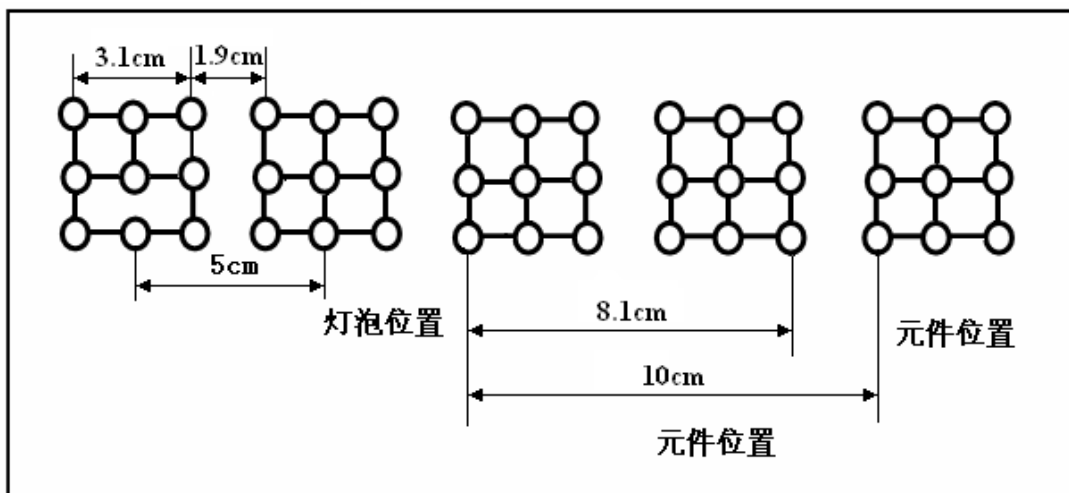


图15 九孔板插孔距离参考图

【思考题】

1. 光敏传感器感应光照有一个滞后时间，即光敏传感器的响应时间，如何来测试光敏传感器的响应时间？
2. 光照强度与距离的关系，验证光照强度与距离的平方成反比（把实验装置近似为点光源）。