



**中国科学技术大学**

University of Science and Technology of China

**欢迎各位同学进入物理实验教学中心  
学习大学物理实验！**

**国家级实验教学示范中心**

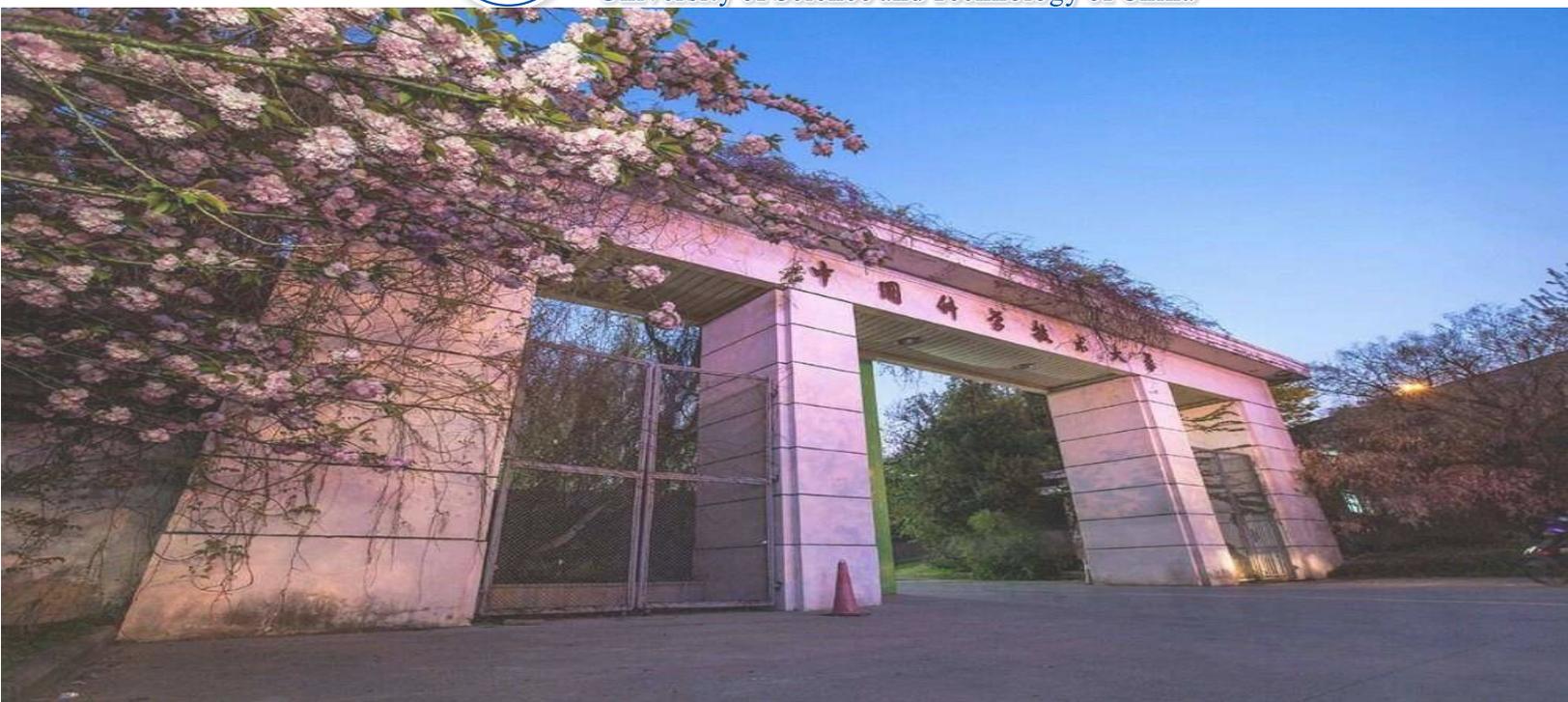
中国科学技术大学物理实验教学中心

中华人民共和国教育部



中国科学技术大学

University of Science and Technology of China



# 《大学物理-基础实验》 绪论

物理实验教学中心

2021. 3. 22

# 4

## 基础实验的课程安排

基础物理实验是进入大学的第一门进行科学实验的课程，是同学们受到系统的实验思想方法和技能训练的开端，也是后续实验课程的基础。

基础物理实验（一级物理实验）的内容主要：

基本物理量的测量；

基本实验仪器的使用；

基本实验技能的训练；

基本测量方法与数据处理、分析；

涉及到力、热、电、光、近代物理的各个知识点，为普及性实验。

# 基础物理实验概况

- 15个实验室、上13周实验课。
- 学生：1931人， 19 位教师 48 位助教 5位实验员

## 力学、热学实验9个

- ◆ 液体表面张力
- ◆ 液体黏滞系数
- ◆ 密度的测量
- ◆ 拉伸法测量杨氏模量
- ◆ 测量切变模量
- ◆ 固体比热容测量
- ◆ 直线运动与碰撞
- ◆ 声速的测量
- ◆ 磁力摆

## 电、磁学实验7个

- ◆ 半导体温度计制作
- ◆ 示波器的使用
- ◆ 直流电源特性研究
- ◆ 整流滤波及应用
- ◆ 硅光电池的光电特性
- ◆ 配色实验
- ◆ 数字体温计

## 光学实验5个

- ◆ 透镜参数测量
- ◆ 干涉法测微小量
- ◆ 分光计的调节和使用
- ◆ 显微镜使用
- ◆ 衍射实验

## 近代物理实验2个

- ◆ 光电效应测量普朗克常数
- ◆ 密歇根油滴实验（测量电子电荷）

## 认知体验类实验

- ◆ 生活中的物理实验（40余项）

**IYPT2021 (17个题目)**

# 一级物理实验课表及循环方式

大学物理基础实验课程表

2021.3

实验室	1418	1210	1413	1424	1312	1429	1423	1204	1419	1428/1433	1322	1303	1402	1401/1416	
主管教员	陶小平	曲广媛	梁燕	浦其荣	李恒一	隋红琳 郭玉刚	蒋作宏 刘应玲	赵伟	黄双安	代如成	赵霞	韦先涛	祝巍	王中平	韦先涛
实验员	胡勇	刘思琦	王晨	胡勇	郑虹	汪启昕	郭强	胡勇	郭强	郭强	王晨	郑虹	郭强	王晨	郭强
实验名称	磁力器 数字温度计	显微镜使用 衍射实验	密度的测量 铜丝杨氏模量	切变模量 固体比热	分光计 A 干涉性测微小量	半导体温度计 示波器的使用	粘滞系数 表面张力	生活中的物理 实验	光电效应 密立根油滴	磁光电池 RGB 配色	匀加速运动 声速测量	分光计 B 透镜参数测量	整流滤波 直流电源特性	IPYT 系列实验	
一下	苗瑞旭 → 曲广媛 → 刘奕琪 → 孟令俊 → 罗静 → 郭玉刚 → 刘应玲 → 蒋伟康 → 王高强 → 周雪峰 → 张滢 → 韦先涛 → 张深 → 刘慧婷													王瑞阳、王平昊	
一晚	101 组 15 人	102 组 15 人	103 组 15 人	104 组 15 人	105 组 15 人	106 组 15 人	107 组 15 人	108 组 15 人	109 组 15 人	110 组 15 人	111 组 15 人	112 组 15 人	113 组 14 人		
	201 组 20 人	202 组 20 人	203 组 20 人	204 组 20 人	205 组 20 人	206 组 20 人	207 组 20 人	208 组 20 人	209 组 20 人	210 组 19 人	211 组 18 人	212 组 18 人	213 组 18 人		
二下 小循环	(教员不跟随学生循环)								(教员跟随学生循环)						
	郭玉刚	晋国勇	朱丹蕾	蔡俊	罗静	郭涛	蒋作宏	张鹏	李恒一	代如成	赵霞	韦先涛	王中平	任鲁欣、赵祥合	
	301 组 20 人	302 组 20 人	303 组 18 人	304 组 18 人	305 组 18 人	306 组 18 人	307 组 18 人	308 组 18 人	309 组 18 人	310 组 18 人	311 组 18 人	312 组 18 人	313 组 18 人		
二晚	张宏帆	蔡建彬	蒋作宏	陈芝期	全煜	隋红琳	李久璞	赵伟、蒋伟康	王瑞庆	陈方才	袁慧刚	方昱菲	张深	王高天	
	401 组 20 人	402 组 20 人	403 组 20 人	404 组 20 人	405 组 20 人	406 组 20 人	407 组 20 人	408 组 20 人	409 组 20 人	410 组 20 人	411 组 18 人	412 组 18 人	413 组 17 人		
三晚	陶小平	占文峰	李婉清	梁莉	徐鹏	刘献宇	李久璞	李嘉杰	王高强	张权	张报邦	赵子健	邱博阳	未知远	
	501 组 20 人	502 组 20 人	503 组 20 人	504 组 20 人	505 组 20 人	506 组 20 人	507 组 20 人	508 组 20 人	509 组 20 人	510 组 20 人	511 组 19 人	512 组 18 人	513 组 18 人		
四下	马塔撒	赵霞	朱丹蕾	陈芝期	曲广媛	刘献宇	浦其荣	董昊	王中平	周雪峰	张报邦	隋红琳	梁燕	沈鹏飞	
	601 组 20 人	602 组 20 人	603 组 20 人	604 组 20 人	605 组 20 人	606 组 20 人	607 组 19 人	608 组 18 人	609 组 18 人	610 组 18 人	611 组 18 人	612 组 18 人	613 组 18 人		
四晚	张宏帆	蔡建彬	刘奕琪	孟令俊	徐鹏	郭涛	李壮	李嘉杰	王瑞庆	陈方才	袁慧刚	赵子健	邱博阳	张伶燕	
	701 组 20 人	702 组 20 人	703 组 20 人	704 组 20 人	705 组 20 人	706 组 20 人	707 组 20 人	708 组 20 人	709 组 18 人	710 组 18 人	711 组 18 人	712 组 18 人	713 组 18 人		
五下 小循环	(教员不跟随学生循环)								(教员跟随学生循环)						
	马塔撒	占文峰	梁燕	梁莉	全煜	邓林肯	李壮	董昊	黄双安	张权	祝巍	赵伟	蔡俊	叶子睿、林淑茂	
	801 组 20 人	802 组 20 人	803 组 20 人	804 组 20 人	805 组 18 人	806 组 18 人	807 组 18 人	808 组 18 人	809 组 18 人	810 组 18 人	811 组 18 人	812 组 18 人	813 组 18 人		

上课时间 下午：2 点至 5 点，晚上：7 点至 10 点。最新讲义 到物理实验教学平台：<http://jxzy.usc.edu.cn> 下载。二下、五下的实验课以小循环方式进行。右侧循环：1419→1428/1433→1322→1303→1402→1401/1416→1419。教员跟随学生循环；左侧循环：1418→1210→1413→1424→1312→1429→1423→1204→1418。教员固定不动。学生循环。注意：1428/1433 实验室第一次全部先做磁光电池，第二次做 RGB 配色实验，1402 实验室第一次全部先做整流滤波实验，第二次做直流电源特性实验，请做好实验预习。

注：IPYT 系列实验 (1401/1416) 适用于右侧小循环同学和 IPYT 竞赛同学进行设计实验，不参与面上实验循环。

# 实验循环

实验室	1418	1210	1413	1424	1312	1429	1423	1204	1419	1428/1433	1322	1303	1402
主管教员	陶小平	曲广媛	梁燕	浦其荣	李恒一	陆红琳 郭玉刚	蒋作宏 刘应玲	赵伟	黄双安	代如成	赵霞	韦先涛	祝巍
实验员	胡勇	刘思琦	王晨	胡勇	郑虹	汪启昕	郭强	胡勇	郭强	郭强	王晨	郑虹	郭强
实验名称	磁力摆 数字体温计	显微镜使用 衍射实验	密度的测量 钢丝杨氏模量	切变模量 固体比热	分光计A 干涉法测微小量	半导体温度计 示波器的使用	粘滞系数 表面张力	生活中的物理实验	光电效应 密立根油滴	硅光电池 RGB配色	匀加速运动 声速测量	分光计B 透镜参数测量	整流滤波 直流电源特性
分组	X01组	X02组	X03组	X04组	X05组	X06组	X07组	X08组	X09组	X10组	X11组	X12组	X13组



## 二下和五下的循环一

实验室	1418	1210	1413	1424	1312	1429	1423	1204
主管教员	陶小平	曲广媛	梁燕	浦其荣	李恒一	陆红琳 郭玉刚	蒋作宏 刘应玲	赵伟
实验员	胡勇	刘思琦	王晨	胡勇	郑虹	汪启昕	郭强	胡勇
实验名称	磁力摆 数字体温计	显微镜使用 衍射实验	密度的测量 钢丝杨氏模量	切变模量 固体比热	分光计A 干涉法测微小量	半导体温度计 示波器的使用	粘滞系数 表面张力	生活中的物理实验
	X01组	X02组	X03组	X04组	X05组	X06组	X07组	X08组

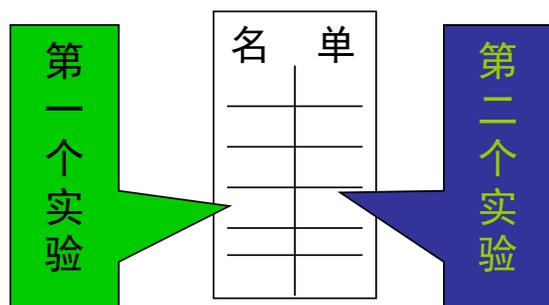


各实验室老师固定，学生循环。

## 二下和五下的循环二

实验室	1419	1428/1433	1322/1324	1303	1402	1401	1416
主管教员	黄双安	代如成	赵霞	韦先涛	祝巍	王中平	韦先涛
实验员	郭强	郭强	王晨	郑虹	郭强	王晨	郭强
实验名称	1. 光电效应 2. 密立根油滴	1. 硅光电池 2. RGB配色	1. 匀加速运动 2. 声速测量	1. 分光计 2. 透镜参数测量	1. 整流滤波 2. 直流电源特性	IYPT系列实验	
	X09组	X10组	X11组	X12组	X13组		

- 1、限二下、五下；
- 2、老师跟随学生循环。



请提前预习两个实验。

## 每个实验室做两周实验

(第一周组内前半同学先做第1个实验，后半同学做第2个实验；第二周交换。)

## 两周实验后循环到下一个实验室

### 两个实验室例外：

1428/1433实验室：第一次都做“硅光电池”，第二次做“RGB配色”

1402实验室：第一次都做“整流滤波”，第二次做“直流电源特性”

# 物理实验课的基本程序和要求

## 预习:

认真阅读实验讲义，观看实验视频、查阅相关资料。

预习考核方式为在线测验，不要求写预习报告。

## 实验:

原始数据需要老师当堂签字。记录原始数据不能用铅笔！

如发现抄数据、凑数据，则该实验成绩为零分！

实验完毕必须整理仪器（操作分）！

扫描实验室二维码参加实验的出门测。

## 实验报告:

一个实验室有两个实验，其中一个实验需要写报告。报告可以手写或电子版打印。



# 预习测试要求

## 测试内容：

该实验的背景、原理、方法和技术（实验讲义）。

## 测试方式：

通过实验讲义中给出的**预习测试链接或二维码**进入测试页面。

请在完成实验预习之后再参加测试，**只能参加一次**（以第一次的结果为准）。

## 测试时间：

1. 只参加当周需要完成实验项目的预习测试（题目定期更换）。
2. 截止时间为上课前（**完成时间在上课开始后的无预习成绩**）。
3. 开放时间：每周周日到周五下午2点；



# 出门测要求

## 测试内容：

实验操作中的要点。

## 测试方式：

扫描实验室张贴的**二维码**进入测试页面。

请在完成实验后参加测试，**只能参加一次**（以第一次的结果为准）。

## 测试时间：

实验数据签字后完成测试。



# 实验报告模版

USTC

## 实验名称

姓名：            学号：            班级：            日期：        年 月 日

实验目的

实验原理（**简述**） 控制在**一页纸**以内，**过多将酌情扣分**。

实验仪器

测量记录

原始数据

**原始数据需教师当堂签字**

分析与讨论

数据处理

误差分析（定量或定性）

实验讨论

思考题



# 报告提交与批阅

- 实验前检查预习情况
- 实验后一周内交完整的实验报告
- 再往后一周由老师批阅报告，上传成绩到教学信息平台，请自己核查分数是否有误。

如发现报告抄袭，则**抄袭人和被抄袭人该实验都记为零分。**

2020年共发现**40余例**报告抄袭。

学生要按时交报告，老师要按时批阅报告，欢迎就实验中的科学问题与老师交流。



# 实验成绩分配

## 实验预习（10分）

实验1预习测试（5分）、实验2预习测试（5分）

## 实验操作（70分）

实验1操作、实验2操作

实验1出门测、实验2出门测

## 实验报告（20分）

实验1或实验2的报告（20分）

根据每个实验室的实际实验情况会做适当调整。



# 上课时间

下午： 2:00-5:00

晚上： 7:00-10:00

整点点名、实验报告点评：

下午： 2:00~2:15

晚上： 7:00~7:15

迟到扣分标准： *超过15分钟，不允许做实验！*

*2分/≤5分钟； 5分/≤10分钟； 10分/≤15分钟*

# 物理实验教学中心网站

网址: <http://jxzy.ustc.edu.cn>

The screenshot displays the website's header with the logo of the Physics Experiment Teaching Center, University of Science and Technology of China. The navigation menu includes: 网站首页, 中心概况, 师资队伍, 仪器设备, 新闻动态, 通知公告, 视频讲座, 精品课程, 教研成果, 规章制度, 教学平台. The main content area features a large image of a team receiving awards, with the caption: 我校代表队在华东地区中国大学生物理学术竞赛中荣获第一名. Below the image is a '新闻动态' section with a link: 我校代表队在第九届全国大学生物理学术竞赛中荣获一等奖, dated 2018-8-26. The left sidebar contains sections for: 物理实验教学中心简介, 通知公告, and 常用链接.

# 教学管理信息平台

The image shows a screenshot of the website for the Physics Department Teaching Center at the University of Science and Technology of China. The page features a blue header with the center's name in Chinese and English, and a navigation menu with items like '网站首页', '中心概况', '师资队伍', '仪器设备', '新闻动态', '通知公告', '视频讲座', '精品课程', '教研成果', '规章制度', and '教学平台'. A red arrow points from the '教学管理信息平台' text to the '教学平台' menu item. The main content area includes a sidebar with '物理实验教学中心简介' and '通知公告', and a central news article titled '我校代表队在华东地区中国大学生物理学术竞赛中荣获第一名' with an accompanying photo of the winning team.

English | 联系我们

网站首页 中心概况 师资队伍 仪器设备 新闻动态 通知公告 视频讲座 精品课程 教研成果 规章制度 教学平台

物理实验教学中心简介

- 为了适应实验教学的需要，中国科学技术大学物理实验教学中心于1998年10月成立，由原来的基础物理中心、物理专业实验教学实验室的基础上组建和整合而成。物理实验教学中心的核心任务是负责全校本科生的基础物理实验教学和物理类专业实验教学。

通知公告

- 继续招聘2019年春季学期助教的通知
- 物理实验教学中心寒假值班表
- 中心2018年度考核报告公示
- 2019年春季学期助教招聘通知
- 关于选拔学生参加第五届全国大学生物理实验竞赛的通知

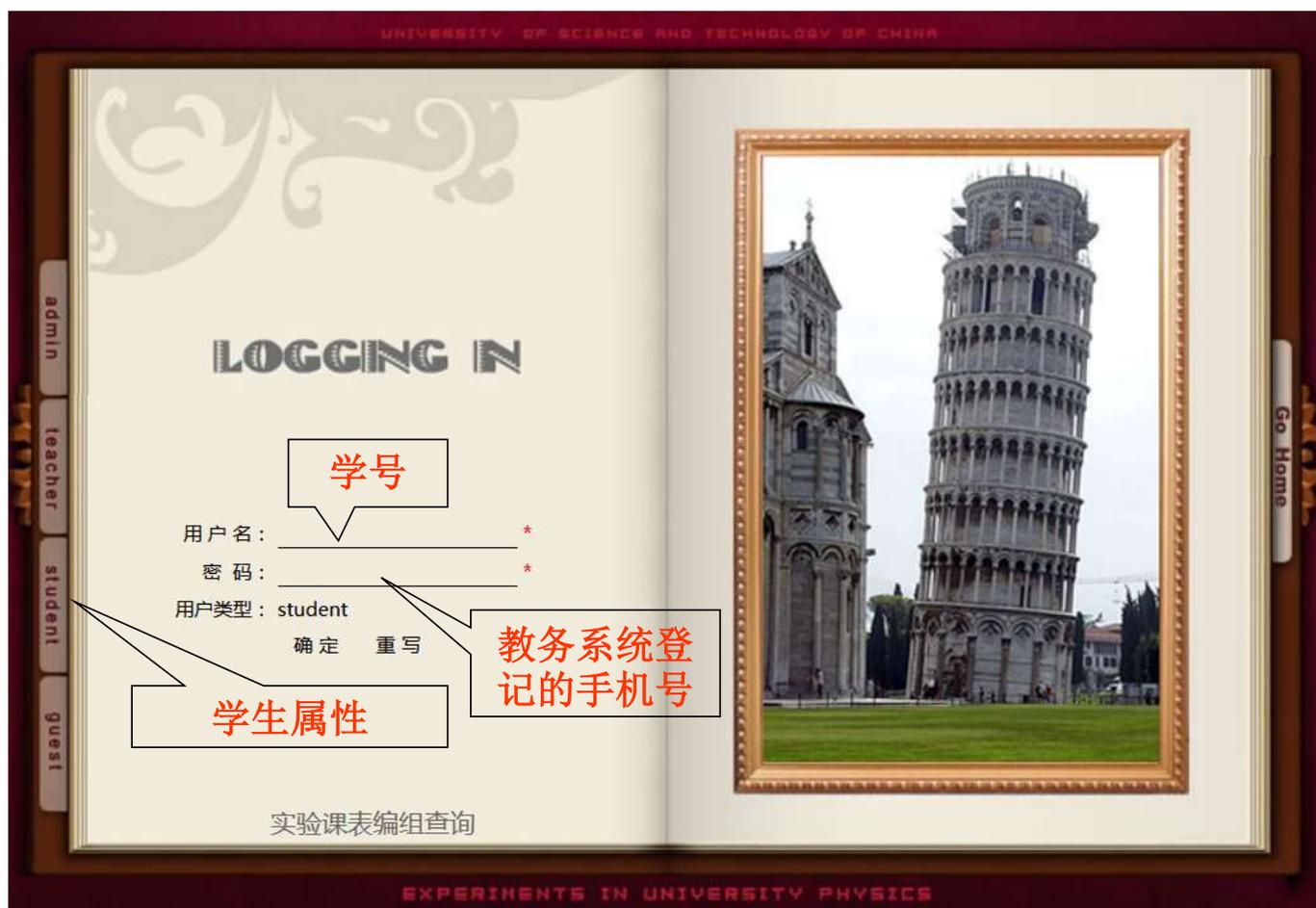
常用链接

新闻动态

我校代表队在华东地区中国大学生物理学术竞赛中荣获第一名

2018-8-26

# 平台登录



# 讲义下载

下载实验讲义

中国科学技术大学

大学物理实验教学与管理信息平台

UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY OF CHINA

- +实验讲义| 退出登录
- >最新实验讲义
- +实验视频
- +教辅课件
- +成绩查询
- +下载专区
- +教学互动
- +教师查询
- +课表查询
- +问卷调查
- +密码管理
- +打开管理首页

※ 学生专栏-->最新讲义浏览:

总计 5 页

按级别查询:

实验级别	实验名称	主管教师	更新时间	下载讲义
1	绪论课预备实验	张宪锋	2017-2-24	下载
1	光电效应法测普朗克常数	黄双安	2017-3-9	下载
1	密立根油滴实验测电子电荷	黄双安	2017-3-9	下载
1	硅光电池光电特性	代如成	2017-3-6	下载
1	配色实验	代如成	2017-4-12	下载
1	匀加速运动与碰撞	赵震	2017-5-10	下载
1	声速测量	赵震	2017-5-10	下载
1	分光计的调节和使用	韦先涛	2018-2-27	下载
1	透镜参数的测量	韦先涛	2017-4-12	下载
1	直流电源特性	张宪锋	2017-2-24	下载
1	整流滤波及应用	张宪锋	2017-2-24	下载
1	磁力摆	陶小平	2017-3-13	下载
1	数字体温计	陶小平	2017-3-13	下载
1	密度的测量	梁燕	2017-3-14	下载
1	钢丝杨氏模量的测量	梁燕	2017-2-20	下载
1	切变模量的测量	浦其荣	2016-3-7	下载
1	固体比热容的测量	浦其荣	2017-4-7	下载
1	液体粘滞系数	蒋作宏	2017-2-23	下载
1	液体表面张力	蒋作宏	2017-2-23	下载
1	干涉法测微小量	韦先涛	2017-3-14	下载

1 2 3 4 5

提示: 讲义实时更新, 请预习后再下载。

# 预习实验视频

播放实验  
视频

中国科学技术大学 大学物理实验教学与管理信息平台

※ 学生专栏-->实验视频:

总计 1 页 快速搜索: 标题 1级 开始搜索

实验级别	实验名称	播放
1	分光计实验 ( 1 , 2 )	播放
1	光电效应实验	播放
1	几何光学实验	播放
1	密立根油滴实验	播放
1	干涉法测微小量	播放
1	拉伸法测杨氏模量	播放
1	用天平测物质密度	播放
1	交流电路	播放
1	用示波器测量时间	播放
1	气垫上的直线运动 ( 1 , 2 )	播放
1	配色实验	播放
1	硅光电池光电特性	播放
1	用焦利氏称测液体表面张力	播放
1	用落球法测液体粘滞系数	播放
1	用混合法测量固体比热容	播放
1	用扭摆测量钢丝的切变模量	播放
1	磁力摆	播放
1	半导体温度计的设计与制作	播放

1

# 预习实验视频

访问国家级精品课程共享网站（爱课程）

English | 联系我们

网站首页 中心概况 师资队伍 仪器设备 新闻动态 通知公告 视频讲座 精品课程 教研成果 规章制度 教学平台

物理实验教学中心简介

- 为了适应实验教学的需要，中国科学技术大学物理实验教学中心于1998年10月成立，由原来的基础物理中心、物理专业实验教学实验室的基础上组建和整合而成。物理实验教学中心的核心任务是负责全校本科生的基础物理实验教学和物理类专业实验教学。

通知公告

- 继续招聘2019年春季学期助教的通知
- 物理实验教学中心暑假值班表
- 中心2018年度考核报告公示
- 2019年春季学期助教招聘通知
- 关于选拔学生参加第五届全国大学生物理实验竞赛的通知

常用链接

新闻动态

我校代表队在华东地区中国大学生物理学术竞赛中荣获第一名

2018-8-26

# 实验纪律

- 迟到15分钟以上不得做实验；
- 请假补课程序：
  - 准备请假资料  
请病假要出示病历，请事假要出示请假条（请假条须由院系教学主任或教务处领导（非班主任）签字）；
  - 开补课单：  
找实验课程负责人（韦先涛，1339办公室）安排补做实验。
- 院系级活动不得影响教学；
- 保持实验室卫生、不吃零食、不穿拖鞋、避免吵闹；
- 报告抄袭按零分处理并报送学校有关部门；
- 若总评成绩不及格，须重修。

## 实验答疑：

1. 信息平台（教学互动板块）

2. 找老师答疑：**（第五周开始）**

周一下午 3:30—5:00 张增明 地点：1238

周三下午 3:30—5:00 韦先涛 地点：1339

周五下午 3:30—5:00 王中平 地点：1235

3. 课程负责人：韦先涛

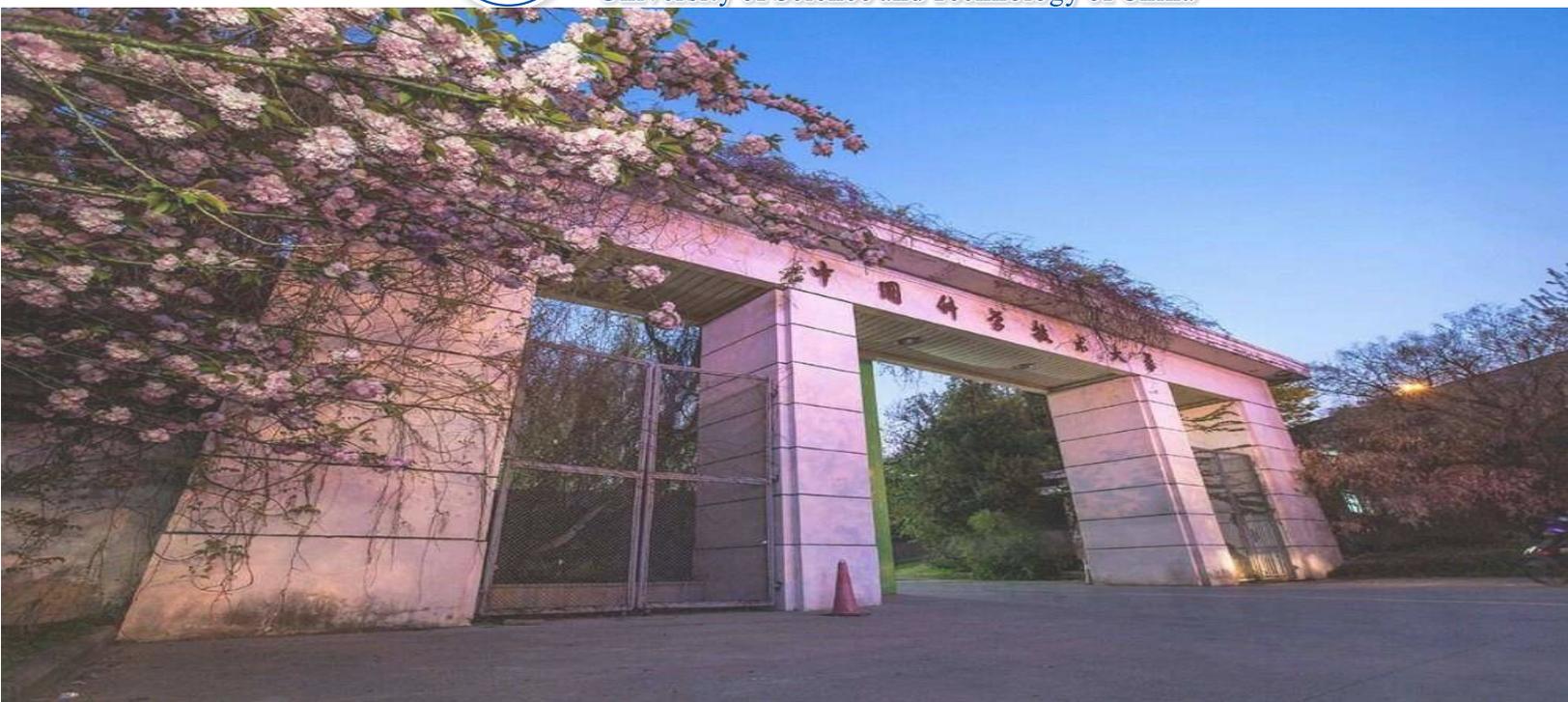
办公室：1339

Email: [wxt@ustc.edu.cn](mailto:wxt@ustc.edu.cn)



中国科学技术大学

University of Science and Technology of China



# 《大学物理-基础实验》 绪论

物理实验教学中心

2021. 3. 16

# 第二章

## 测量的不确定度和数据处理



# 内容大纲



测量的不确定度



数据处理



## 2

# 数据处理

---

## 1. 有效数字

- 测量结果中可靠的几位数加上不确定的一位数

测量只写到开始有误差的那一位，该位数后：四舍六入五凑偶。

- 有效数字的位数与小数点无关：

1.23和123相同

0.0123和0.01230不同

1.35和1.3500不同

## 物理量的有效数字

- 直接测量：仪器的最小分度+1位估读位
- 间接测量：与运算方式有关
  - 加减运算：最大不确定度分量决定：  
 $432.3+0.1263-2=430$
  - 乘除运算：最少有效数字分量决定：  
 $48 \times 3.2345 / 1.73^2 = 52$   
 $48 \times 3.2345 / 0.173^2 = 5.2 \times 10^3$

- 常数（如 $\pi$ 等）多保留**1**位
- 中间计算结果的有效数字：可多保留**1**位

## 不确定度的有效数字

- 通常保留1位
- 当第一位是1或2时，可保留2位

## 最终结果的有效数字

- 物理量的有效数字与不确定度对齐

例：测量圆柱体合金的密度，求标准不确定度

已知： $m = 14.00 \text{ g}$ ，允差 $0.04 \text{ g}$

直径 $D$ 用千分尺，高 $H$ 用游标卡尺

$D/\text{mm}$	10.502	10.488	10.516	10.480	10.495	10.470
$H/\text{mm}$	20.00	20.02	19.98	20.00	20.00	20.02

不同分布测量仪器的置信概率 $P$ 与置信因子 $k_p$

$k_p \backslash P$	0.500	0.577	0.650	0.683	0.900	0.950	0.955	0.990	0.997
正态分布	0.675			1.000	1.650	1.960	2.000	2.580	3.000
均匀分布	0.877	1.000		1.183	1.559	1.645	1.654	1.715	1.727
三角分布	0.717	0.862	1.000	1.064	1.675	1.901	1.929	2.204	2.315

几种常见仪器的误差分布与置信系数

仪器	米尺	游标卡尺	千分尺	物理天平	秒表
误差分布	正态	均匀	正态	正态	正态
置信系数 $C$	3	$\sqrt{3}$	3	3	3

$D/mm$	10.502	10.488	10.516	10.480	10.495	10.470
--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------

$$\bar{D} = 10.4918 \quad mm \quad \text{中间结果可多保留一位}$$

$$u_{AD} = \frac{\sigma_D}{\sqrt{n}} = 0.007 \quad mm$$

$$u_{BD} = \frac{\Delta_D}{C} = \frac{0.004}{3} = 0.0013 \quad mm$$

$$\begin{aligned} u_D &= \sqrt{(t_p \times u_{AD})^2 + u_{BD}^2} \\ &= \sqrt{(1.11 \times 0.007)^2 + 0.0013^2} \\ &= 0.008 \quad mm \end{aligned}$$

$$D = \bar{D} \pm u_D = (10.492 \pm 0.008) \quad mm \quad (P = 0.683)$$

$H/mm$	20.00	20.02	19.98	20.00	20.00	20.02
--------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

$$\bar{H} = 20.003 \quad mm$$

中间结果可多保留一位

$$u_{AH} = \frac{\sigma_H}{\sqrt{n}} = 0.006 \quad mm$$

$$u_{BH} = \frac{\Delta_H}{C} = \frac{0.02}{\sqrt{3}} = 0.0115 = 0.012 \quad mm$$

$$\begin{aligned} u_H &= \sqrt{(t_p \times u_{AH})^2 + (k_p \times u_{BH})^2} \\ &= \sqrt{(1.11 \times 0.006)^2 + (1.183 \times 0.012)^2} \\ &= 0.016 \quad mm \end{aligned}$$

$$H = \bar{H} \pm u_H = (20.003 \pm 0.016) \quad mm \quad (P = 0.683)$$

$m = 14.00 \text{ g}$ , 允差  $0.04 \text{ g}$

$$u_{Bm} = \frac{0.04}{3} \approx 0.013 \text{ g}$$

$$\begin{aligned} u_m &= \sqrt{u_{Am}^2 + u_{Bm}^2} \\ &= \frac{0.04}{3} \\ &\approx 0.01 \text{ g} \end{aligned}$$

$$m = (14.00 \pm 0.01) \text{ g} \quad (P = 0.683)$$

$$\rho = \frac{4m}{\pi D^2 H} = \frac{4 \times 14.00}{3.1416 \times 10.492^2 \times 20.003} = 8.094 \times 10^{-3} \text{ g/mm}^3 = 8.094 \text{ g/cm}^3$$

常数多取一位 3.1416

$$\begin{aligned} \frac{u_\rho}{\rho} &= \sqrt{\left(\frac{u_m}{m}\right)^2 + \left(\frac{2u_d}{\bar{D}}\right)^2 + \left(\frac{u_h}{\bar{H}}\right)^2} \\ &= \sqrt{\left(\frac{0.02}{14.00}\right)^2 + \left(\frac{2 \times 0.008}{10.492}\right)^2 + \left(\frac{0.016}{20.003}\right)^2} \\ &= 0.0022 \end{aligned}$$

$$u_\rho = 8.094 \times 0.0022 = 0.018 \text{ g/cm}^3$$

$$\rho = (8.094 \pm 0.018) \text{ g/cm}^3 \quad (P = 0.683)$$

# 实验结果的表示

测量结果的有效数字的位数取决于测量结果的不确定度。

1. 不确定度通常只取一位有效数字，首位数字小于3时，可取2位有效数字
2. 不确定度的取舍也采用四舍六入五凑偶
3. 测量结果的有效位数要向不确定度看齐
4. 实验结果一般用绝对不确定度表示，也可用相对不确定度表示。

## 2. 常用数据处理方法

### 2.1 列表法

### 2.2 作图法

### 2.3 最小二乘法

## 2.1 列表法

- 记录原始数据的最好方法
- 格式要求：
  - (1) 列表名称
  - (2) 测量量的名称、单位等信息
  - (3) 要正确反映测量数据的有效数字
  - (4) 用钢笔/圆珠笔，如实记录数据
  - (5) 表格力求简单明了，一目了然

测量圆柱体的直径 $D$ （千分尺）和高 $H$ （游标卡尺）

D/mm	10.502	10.488	10.516	10.480	10.495	10.470
H/mm	20.00	20.02	19.98	20.00	20.00	20.02

或者

测量圆柱体的直径 $D$ （千分尺）和高 $H$ （游标卡尺）

D/mm 10.502 10.488 10.516 10.480 10.495 10.470

H/mm 20.00 20.02 19.98 20.00 20.00 20.02

## 列表法的优点：

- (1) 数据易于参考比较，便于检查数据的合理性、发现问题，指导实验
- (2) 一个表可同时记录多个变量间的变化而不紊乱
- (3) 便于以后随时处理数据，分析问题

## 2.2 作图法

- 坐标纸

直角、半对数、对数坐标纸等

- 应用软件

origin、matlab、mathematica

教学平台课件：Origin8简易使用教程

**在网络中心网站下载正版软件!**

# 中国科学技术大学 正版软件

USTC

入口：信息门户 > 正版软件



中国科学技术大学  
University of Science and Technology of China

## 正版软件

### 产品列表

Windows Office **ORIGIN** **MATLAB** 高斯 Mathematica 福昕PDF NOD32

产品名称

工具或使用说明

· OriginPro 2020	使用说明 培训材料
· OriginPro 2019	使用说明 培训材料
· OriginPro 2018b	使用说明 培训材料
· OriginPro 2018	使用说明 培训材料
· OriginPro 2017	使用说明 培训材料
· OriginPro 2018	使用说明 培训材料

- origin软件授权及相关问题请联系吴老师 ( 63603498 )
- 修改界面语言请在使用Help菜单里面的Change Language...选项
- 如有我校老师教学中需要Origin公司协助准备教程等, 可以联系李会民老师 ( 63600316,hmli@ustc.edu.cn )

### 工具 and 文档

- 自动更新服务
- 软件安装说明
- Kms激活说明
- 应对windows和office 非标准安装不能认证处理脚本
- ISO to USB --U盘制作工具
- Rufus --U盘制作工具
- UltraISO使用方法
- XDM(Xtreme Download Manager)\_下载工具

<http://zbh.ustc.edu.cn/zbh.php>

## 作图的格式要求

1. 坐标轴、方向，物理量名称和单位，分度。
2. 图号和图的名称。
3. 可靠数字在图中应可靠，估读位在图中应是估计的，即图纸中的一小格对应数值中可靠数字的最后一位。
4. 适当选取x轴和y轴的比例和坐标的起点，使图线比较对称的充满整个图纸，不要缩在一边或一角。除特殊需要以外，坐标轴的起点一般不一定取为零值。



### 标明坐标轴：

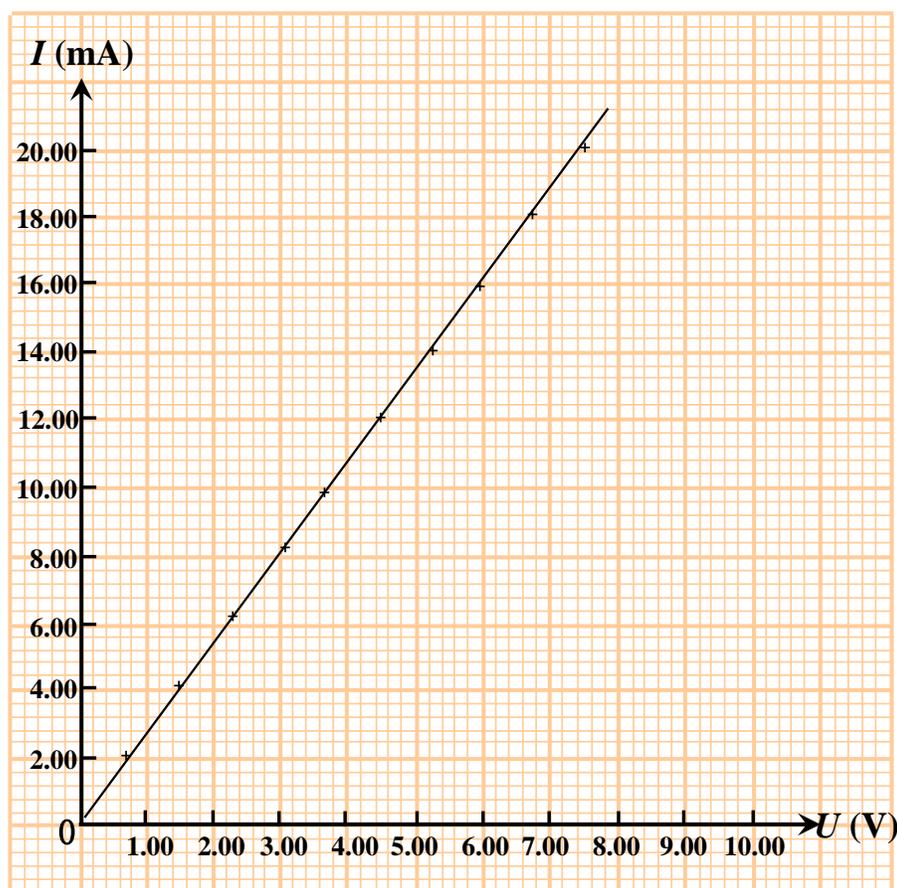
用粗实线画坐标轴，用箭头标轴方向，标坐标轴的**名称或符号、单位**，再按顺序标出坐标轴整分格上的量值。

### 标实验点：

实验点可用“+”、“°”、“•”等符号标出（同一坐标系下不同曲线用不同的符号）。

### 连线：

用直尺、曲线板等把点连成直线、光滑曲线。一般不强求直线或曲线通过每个实验点，应使连线两边的实验点与图线最为接近且分布大体均匀。



### 标出图线特征：

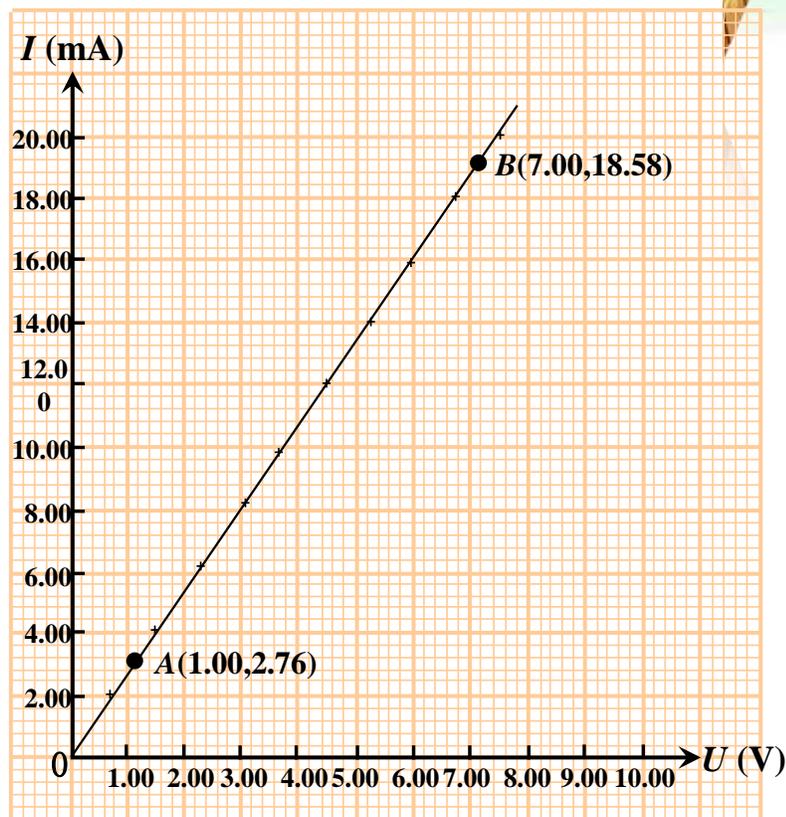
在图上空白位置标明实验条件或从图上得出的某些参数。如利用所绘直线可给出被测电阻  $R$  大小：从所绘直线上读取两点  $A$ 、 $B$  的坐标就可求出  $R$  值。

由图上  $A$ 、 $B$  两点可得被测电阻  $R$  为：

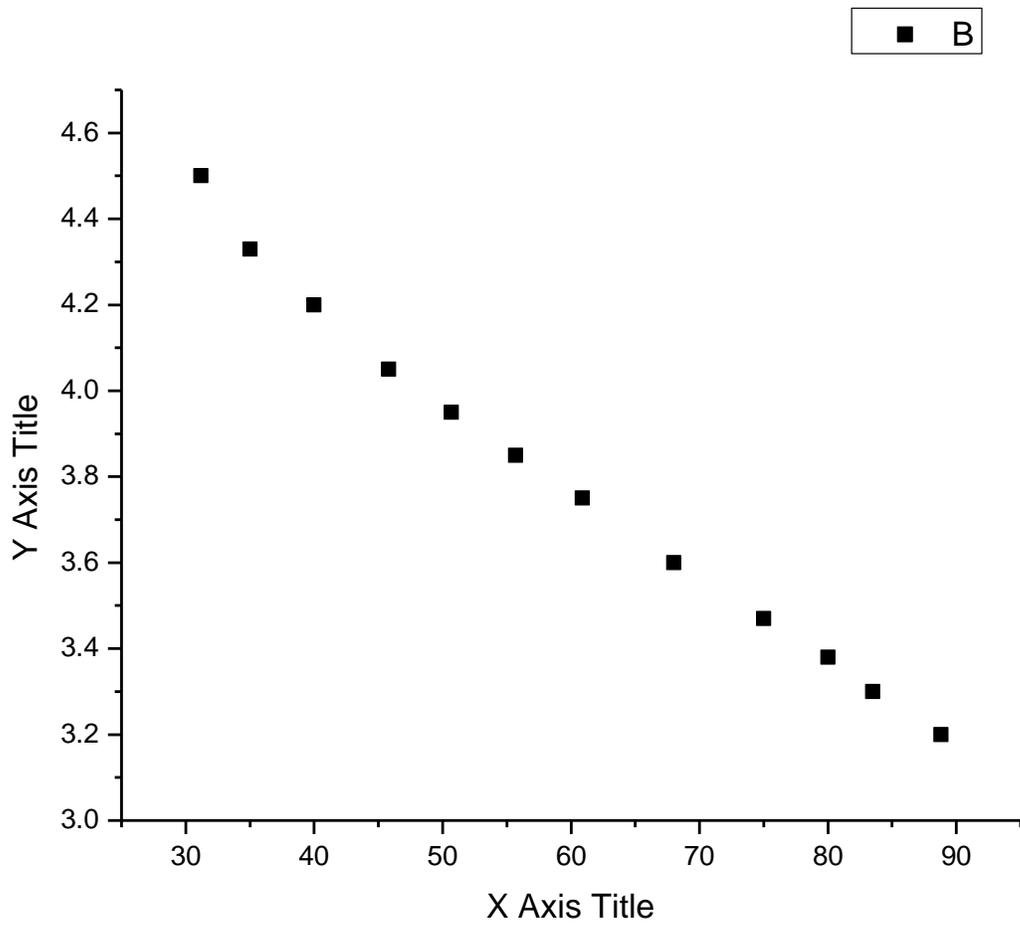
$$R = \frac{U_B - U_A}{I_B - I_A} = \frac{7.00 - 1.00}{18.58 - 2.76} = 0.379(\text{k}\Omega)$$

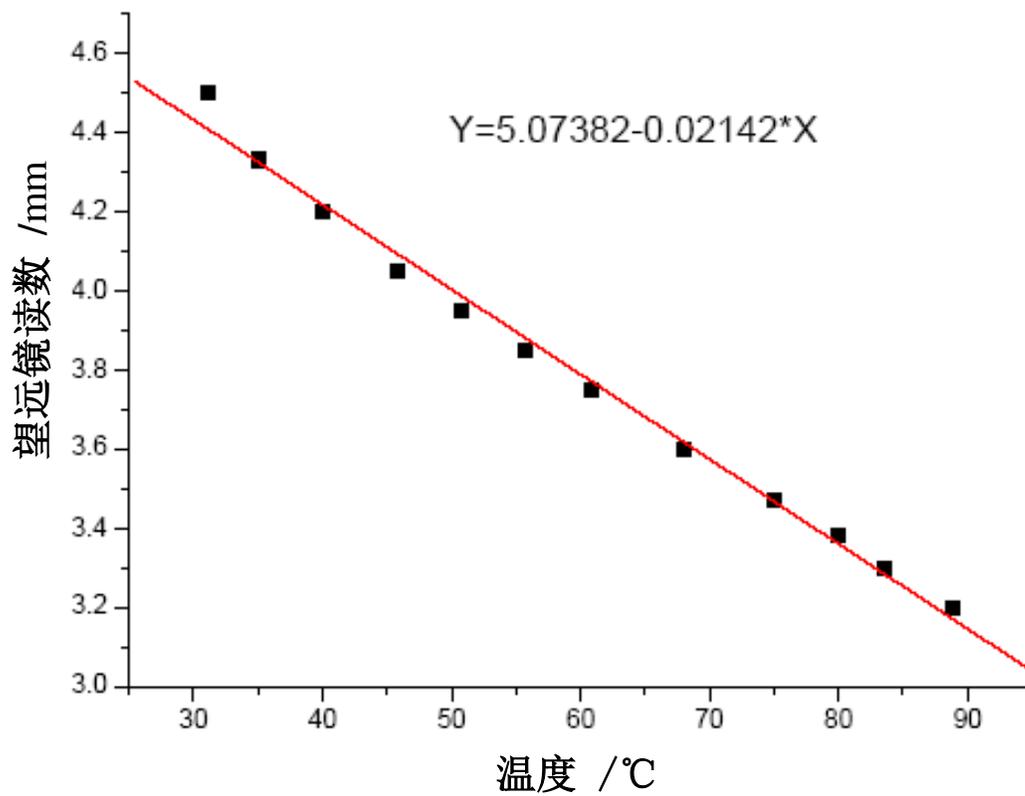
### 标出图名：

在图线下方或空白位置写出图的名称及某些必要的说明。



电阻伏安特性曲线

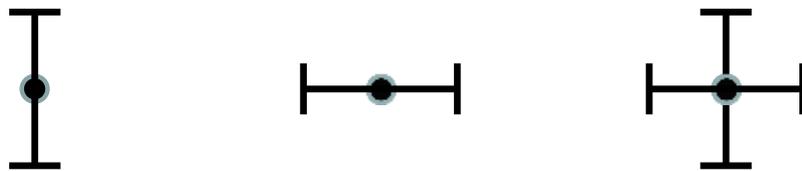




**图1 光杠杆法测铜棒的长度与温度的关系**

## 误差杆：不确定度的图示

- 以数据点为基点，误差杆长度的一半表示相应不确定度的大小。

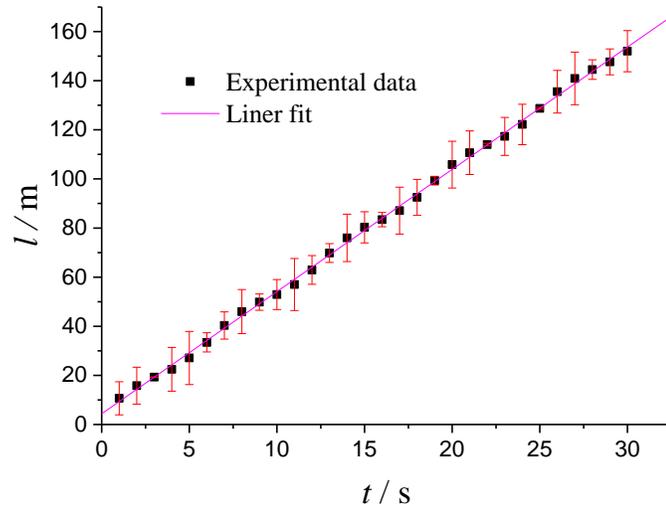


实验数据:

$$l = 4 + 5t + 2\sin(t)$$

拟合数据:

$$l = 4.35 + 4.98t$$



$d/\mu\text{m}$	25	50	75	100	125	150	175
$U/V$	44.26	37.71	31.19	25.79	20.90	18.36	15.00
$\Delta U/V$	1.9	1.6	1.3	1.1	0.9	0.8	0.6

$$U = U_0 e^{-ad}$$

$$U-d: 2\Delta U$$

$$\ln U-d: 2\Delta U/U$$

## 2.3 最小二乘法

用作图法把实验数据表示成曲线，固然可以看出事物之间的规律，但毕竟不如方程来得确切。如何从实验数据出发求出方程，这也是数据处理中常常遇到的问题。

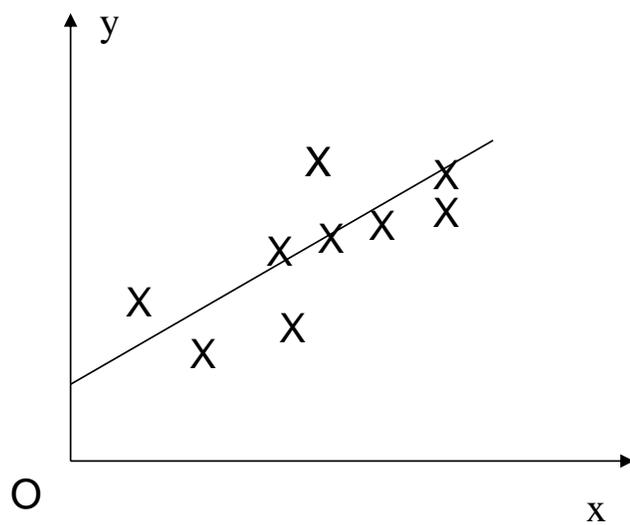
方程的回归，首先要确定函数的形式

- 线性的函数关系，则可写成  $Y = mx + b$
- 指数函数关系，则可写成：  $Y = ae^{bx} + c$
- 函数关系不明确，则常用多项式来表示：

$$Y = a_0X + a_1X^2 + \dots$$

- 最小二乘法:

$$s = \sum_i (y_i - f(x_i))^2 \quad \text{最小}$$



函数关系  $y = f(x) = mx + b$

$$s(m, b) = \sum_{i=1}^k [y_i - (mx_i + b)]^2$$

$$m = \frac{\overline{xy} - \bar{x} \cdot \bar{y}}{\overline{x^2} - \bar{x}^2}$$

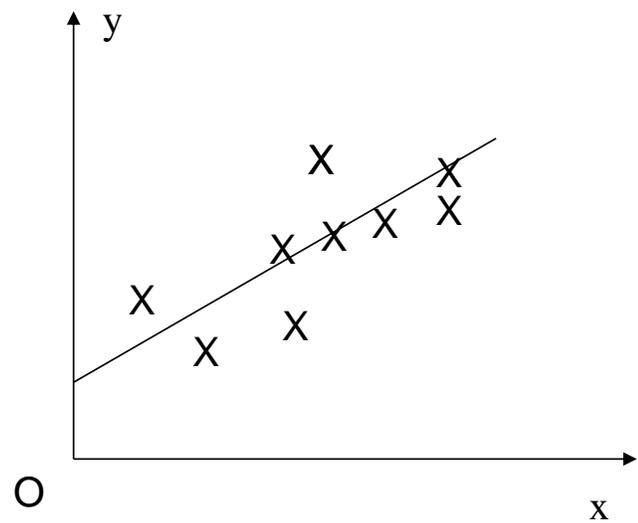
$$b = \bar{y} - m\bar{x}$$

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

$$\overline{xy} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i y_i$$

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i$$

$$\overline{x^2} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^2$$



## 相关系数 $r$ :

定量描述 $x$ 、 $y$ 变量之间线性相关程度的好坏。

$$r = \frac{\overline{xy} - \bar{x} \cdot \bar{y}}{\sqrt{[\overline{x^2} - (\bar{x})^2][\overline{y^2} - (\bar{y})^2]}}$$
$$-1 \leq r \leq 1$$

$r$  值在中  $0 < |r| < 1$ ,  $r$  越接近于1,  $x, y$  之间线性相关越好;  $r$  为正, 称为正相关;  $r$  为负, 称为负相关; 接近于0, 为非线性。

# 相关系数阈值 $r_0$

附表二：相关系数临界值表

$$P(|\rho| > \rho_\alpha) = \alpha \quad (\text{表中 } n-2 \text{ 是自由度})$$

$\alpha$ $n-2$	0.10	0.05	0.02	0.01	0.001	$\alpha$ $n-2$
1	0.987 69	0.099 692	0.999 507	<b>0.999 877</b>	0.999 998 8	<b>1</b>
2	0.900 00	0.950 00	0.980 00	0.990 00	0.999 00	<b>2</b>
3	0.805 4	0.878 3	0.934 33	0.958 73	0.991 16	<b>3</b>
4	0.729 3	0.811 4	0.882 2	0.917 20	0.974 06	<b>4</b>
5	0.669 4	0.754 5	0.832 9	0.874 5	0.950 74	<b>5</b>
6	0.621 5	0.706 7	0.788 7	0.834 3	0.924 93	<b>6</b>
7	0.582 2	0.666 4	0.749 8	0.797 7	0.898 2	<b>7</b>
8	0.549 4	0.631 9	0.715 5	0.764 6	0.872 1	<b>8</b>
9	0.521 4	0.602 1	0.685 1	0.734 8	0.847 1	<b>9</b>
10	0.497 3	0.576 0	0.658 1	0.707 9	0.823 3	<b>10</b>

$r_0$ 是与测量次数 $n$ 有关的量，一般可以通过查表得到。

- $r > r_0$ :  $x, y$ 之间是线性，可以用最小二乘法进行回归。
- $r < r_0$ :  $x, y$ 之间是非线性，不可以用最小二乘法进行回归。

## 斜率 $m$ 和截距 $b$ 的不确定度评定

- 斜率 $m$ 的标准差为

$$s_m = m \sqrt{\left(\frac{1}{r^2} - 1\right) / (n - 2)}$$

- 截距 $b$ 的标准差为

$$s_b = \sqrt{x^2} \cdot s_m$$

- 斜率 $m$ 和截距 $b$ 的扩展不确定度

$$u_m = t_p s_m; \quad u_b = t_p s_b$$

式中 $t_p$ 是置信概率 $P$ （或显著性水平 $\alpha=1-P$ ）时，根据自由度 $\nu=N-2$ 查 $t$ 分布表所得到的 $t$ 值。

## t 分布表

$t_P$ $v$	$P$	0.997	0.95	0.683
1		235.80	12.71	1.84
2		19.21	4.30	1.32
3		9.21	3.18	1.20
4		6.62	2.78	1.14
5		5.51	2.57	1.11
6		4.90	2.45	1.09
7		4.53	2.36	1.08
8		4.28	2.31	1.07
9		4.09	2.26	1.06
10		3.96	2.23	1.05
11		3.85	2.20	1.05
12		3.76	2.18	1.04
13		3.69	2.16	1.04
14		3.64	2.14	1.04
15		3.59	2.13	1.03
16		3.54	2.12	1.03
17		3.51	2.11	1.03
18		3.48	2.10	1.03
19		3.45	2.09	1.03
20		3.42	2.09	1.03
$\infty$		3.00	1.96	1

**谢谢!**



**中国科学技术大学**

University of Science and Technology of China

**欢迎各位同学进入物理实验教学中心  
学习大学物理实验！**

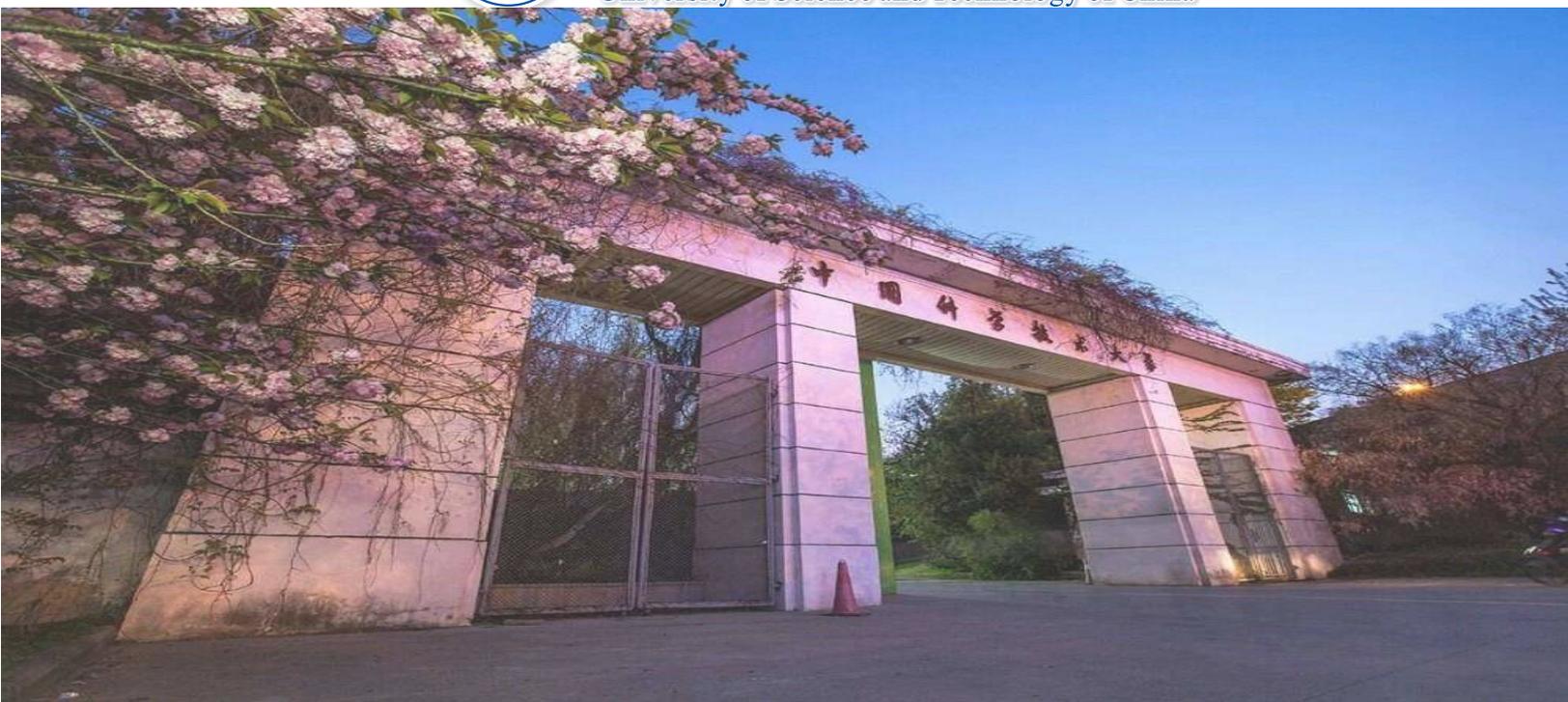
**国家级实验教学示范中心**

中国科学技术大学物理实验教学中心

中华人民共和国教育部



中国科学技术大学  
University of Science and Technology of China



# 《大学物理-基础实验》 绪论

物理实验教学中心  
2021. 3. 22

# 5

## 测量的不确定度

### 误差

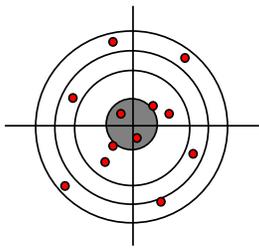
- 测量

- 直接测量：长度、质量、时间等
- 间接测量：重力加速度、速度等
- 等精度测量：同人、同法、同仪器、同条件下对同一物理量进行多次测量
- 真值：物理量的真实值 (一般不知道)

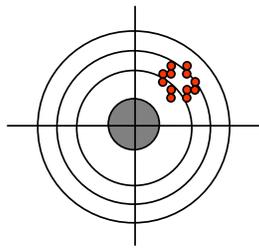
- 测量误差 = 测量值 - 真值

# 正确度、精密度、精确度

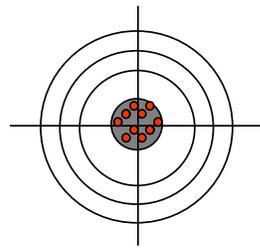
- **正确度**：测量值与真值的接近程度。反映测量结果系统误差大小的术语。
- **精密度**：重复测量所得测量结果相互接近的程度。反映测量结果随机误差大小的术语。
- **精确度**：综合评定测量结果的重复性和接近真值的程度。反映随机误差和系统误差的综合效果。



正确度高  
精密度低



精密度高  
正确度低



精密度、正确度  
精确度均高

# 误差的来源

- 方法误差

测量方法或测量原理本身所引起的

- 仪器误差

测量设备或仪器本身固有的各种因素的影响

- 环境误差

周围环境的影响

- 主观误差

测量操作人员的素质影响

# 误差类别

## ● 系统误差

- 公式近似
- 仪器结构不完善
- 环境条件：环境误差
- 生理、心理因素
- 特点：恒定，经验积累减小误差

## ● 偶然误差：

- 随机性

# 系统误差

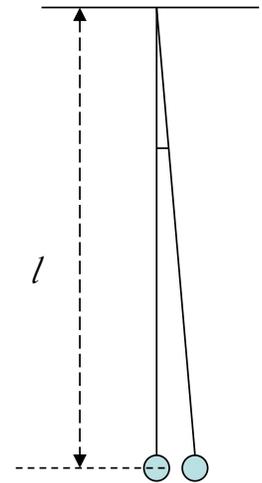
公式近似：理论误差

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}$$

单摆：  $T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g} (1 + \frac{1}{4} \sin^2 \frac{\theta}{2} + L)}$

$$A = 1, \theta = 0$$

$$A = 1.0005, \theta = 5^\circ$$



绝热系统：补偿法

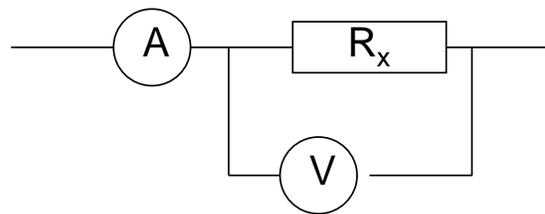
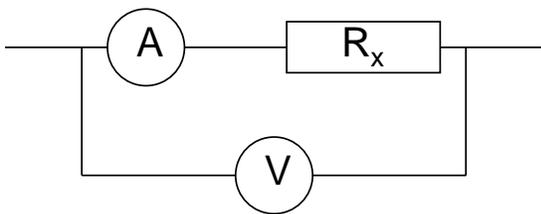
伏安法测电阻

内接法

$$R_x > \sqrt{R_A \cdot R_V}$$

外接法

$$R_x < \sqrt{R_A \cdot R_V}$$



减小电表内阻引起的误差

# 系统误差

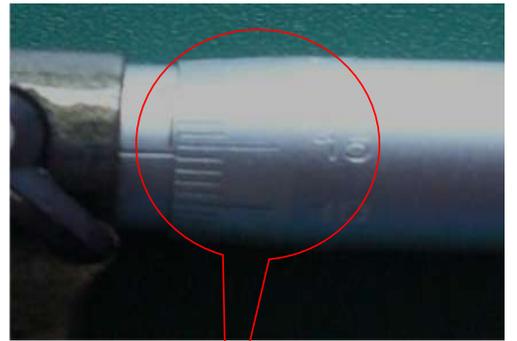
—仪器误差



结构不完善

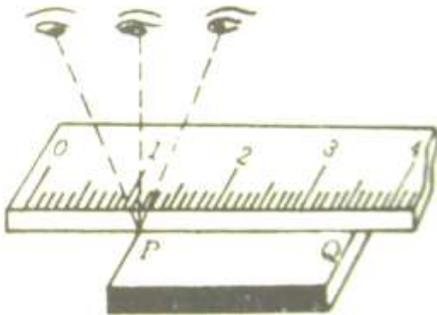
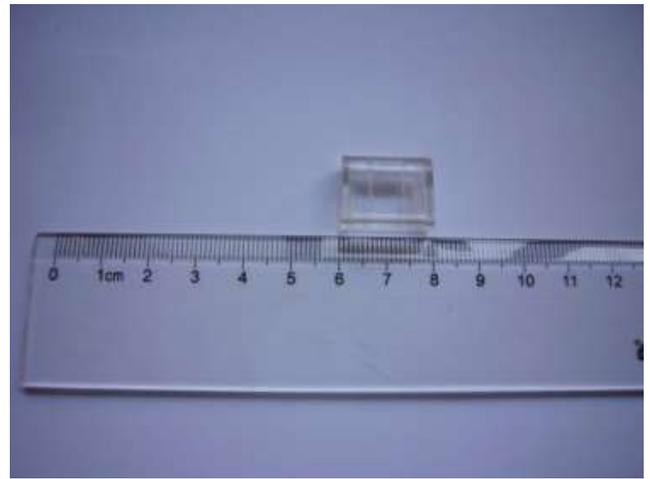
螺旋测微计零点不准确  
(校准)

- 天平不等臂  
(交换)



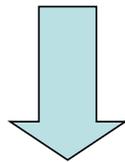
# 系统误差

-个人误差：生理、心理因素；按钮超前、滞后，斜视



# 偶然误差

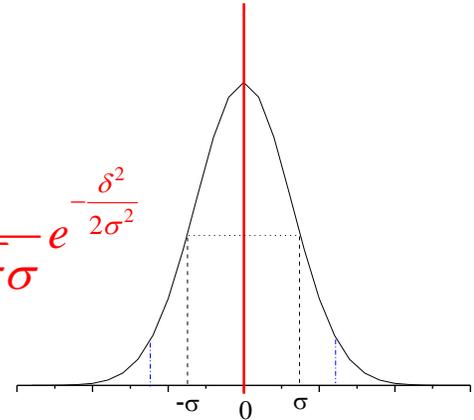
- 特点：随机性，服从正态分布(单峰、对称、有界、抵偿性)
- 抵偿性：多次测量，增加测量次数



偶然误差可以减小，但无法消除

服从正态分布的误差特征：对称性、单峰性、有界性

$$Y(\delta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{\delta^2}{2\sigma^2}}$$



$$\int_{-\sigma}^{\sigma} Y(\delta) d\delta = 0.683$$

$$\int_{-2\sigma}^{2\sigma} Y(\delta) d\delta = 0.954$$

$$\int_{-3\sigma}^{3\sigma} Y(\delta) d\delta = 0.997$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} Y(\delta) d\delta = 1$$

测量误差=测量值-真值

一般不知道!!

$$Y = N \pm \Delta N$$

如何描述?

测量误差→不确定度

$$Y = N \pm U_P$$

# 测量的不确定度

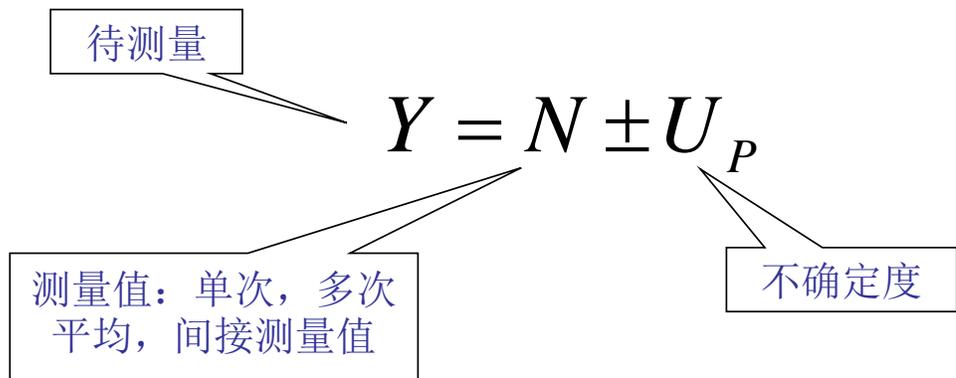
## **A类不确定度：**

由观测列统计分析评定，也称统计不确定度(多次等精度测量)。

## **B类不确定度：**

不用统计分析评定，也称非统计不确定度。  
每次测量都应考虑B类不确定度。

# 物理量Y



不确定度：代表测量值 $N$ 不确定的程度，也是对测量误差的可能值的测度，对待测真值可能存在的范围的估计。

测量结果范围：  $[N - U_P, N + U_P]$     置信区间大，置信概率大

置信概率： 100%，  $\Delta N$ ： 极限不确定度，     $Y = N \pm \Delta N$

相对不确定度：  $\frac{\Delta N}{N}$

# 不确定度的评定

直接测量结果的不确定度:

平均值

$$\bar{N} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n N_i$$

定义(贝塞尔公式):  
测量列的标准差

$$\sigma_N = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (N_i - \bar{N})^2}{n-1}}$$

## 3σ称极限误差:

测量次数无限多时, 测量误差的绝对值大于3σ的概率仅为0.3%, 对于有限次测量, 这种可能性是微乎其微, 因此可以认为是测量失误, 应予以剔除。

$$u_A = \frac{\sigma_N}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (N_i - \bar{N})^2}{n(n-1)}}$$

平均值的标准差

对正态分布：

$$P\left(\bar{x} \in \left[\bar{x} - u_A, \bar{x} + u_A\right]\right) = 0.683$$

$$P\left(\bar{x} \in \left[\bar{x} - 2u_A, \bar{x} + 2u_A\right]\right) = 0.954$$

$$P\left(\bar{x} \in \left[\bar{x} - 3u_A, \bar{x} + 3u_A\right]\right) = 0.997$$

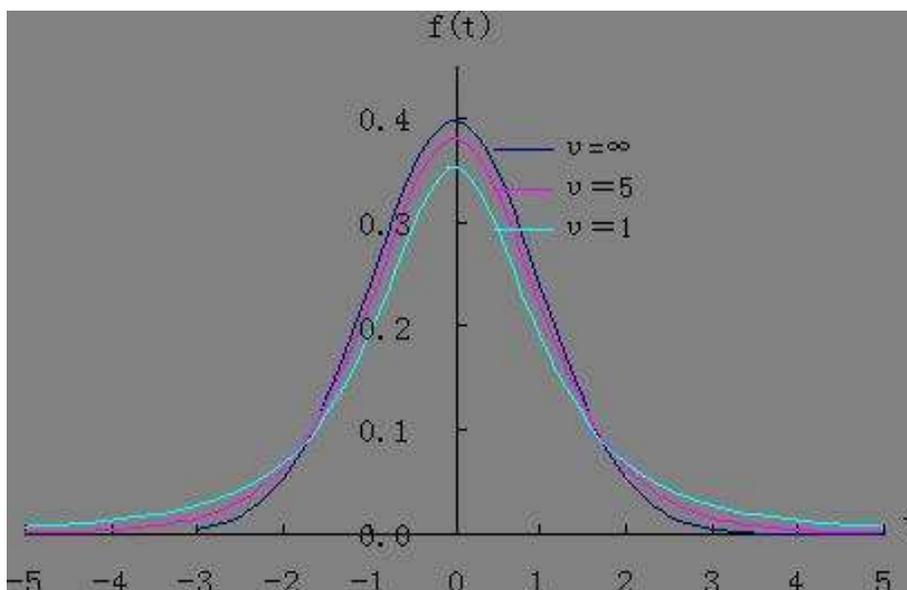
# 测量次数较少时，不确定度的修正

$$u_t = t_p u_A$$

扩大置信区间

$$\left[ -t_p u_A, t_p u_A \right]$$

获得相同的概率



n/t/p	3	4	5	6	7	8	9	10	$\infty$
0.68	1.32	1.20	1.14	1.11	1.09	1.08	1.07	1.06	1
0.90	2.92	2.35	2.13	2.02	1.94	1.86	1.83	1.76	1.65
0.95	4.30	3.18	2.78	2.57	2.46	2.37	2.31	2.26	1.96
0.99	9.93	5.84	4.60	4.03	3.71	3.50	3.36	3.25	2.58

$t_p$ 与测量次数有关  
见：P30

# B类不确定度

不能用统计方法来处理的不确定度均为B类不确定度。

- 仪器的最大允差
- 估计误差

## ❖ 测量仪器的最大允差 $\Delta_{\text{仪器}}$

包含了仪器的系统误差，也包含了环境以及测量者自身可能出现的变化（具随机性）对测量结果的影响。最大允差可从仪器说明书中得到，它表征同一规格型号的合格产品，在正常使用条件下，可能产生的最大误差。一般而言，为仪器最小刻度所对应的物理量的数量级（但不同仪器差别很大）。（第26页）

# 各种仪器的最大允差

- 指针电表级别：5.0, 2.0, 1.5, 1.0, 0.5, 0.2, 0.1
- 指针电表：量程  $\times$  级别 %
- 数字电表：读数  $\times$  C%+稳定显示后一位的几个单位
  
- 钢卷尺：1m/1mm  $\pm$ 0.8mm, 2m/1mm  $\pm$ 1.2mm
- 游标卡尺：  
125mm/0.02mm  $\pm$ 0.02mm  
300mm/0.02mm  $\pm$ 0.05mm
- 螺旋测微器：25mm/0.01mm  $\pm$ 0.004mm

## 电阻箱：

**ZX38p/11 型交直流电阻箱**

标准代号：JB/T10057-1999、JB/T8225-1999 15...20...25°C

盘名	X10kΩ	X1kΩ	X100Ω	X10Ω	X1Ω	X0.1Ω
准确度等级指数	0.1	0.1	0.1	0.2	1	2
测试电流	4mA	45mA	45mA	140mA	450mA	450mA
时间常数(μs)	<1	<0.1	<0.1	<0.1	<1	—

0...0.2...0.5W       $R_0 = 20\text{m}\Omega \pm 10\text{m}\Omega$        $L_0 = 2\mu\text{H}$



## 色环电阻：



- 最后一环表示误差，常用有：银色（10%）、金色（5%）、棕色（1%）。

## 贴片电阻：



- 阻值误差精度常用的是±1%和±5%
- ±5%精度的常用3位数来表示  
103代表10 KΩ（±5%）
- ±1%精度的常用4位数来表示

## ❖ 测量仪器的最大允差

**模拟式仪表：**  $\Delta_{\text{仪器}} = \text{量程} \times \text{级别}\%$

例：量程为**100V**的**1.0**级电压表，测量一个电池的电动势为**1.5V**。则仪表的最大允差为**1.0V**。若量程为**10V**，则降低到**0.1V**。

**数字式仪表：**  $\Delta_{\text{仪器}} = \text{读数} \times C\% + \text{稳定显示后一位的几个单位}$

例：某精度为1.0级的三位半电表，用20.00 V量程测量电池电动势，读数为1.50 V。按其说明书，读数乘级别的1%，假设末位数字跳动5个单位，则测量结果的最大允差为：

$$(0.015 + 0.05) = 0.065 \text{ V}。$$

若改用2.000 V量程，则为  $(0.015 + 0.005) = 0.020 \text{ V}$ 。

❖ 测量时的估计误差  $\Delta_{\text{估计}}$

模拟式仪表:  $\Delta_{\text{估计}} < \text{最小分度的一半}$

数字式仪表:  $\Delta_{\text{估计}} = 0$

特殊情况

秒表计时估计误差:  $\Delta_{\text{估计}} = 0.2s$  ?  $\Delta_{\text{仪}} = 0.01s$

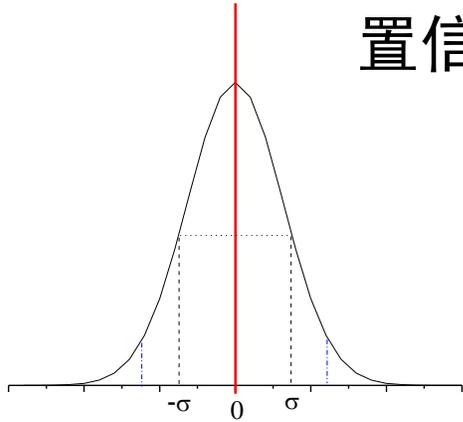
❖ **B类不确定度的最大值**

$$\Delta_B = \sqrt{\Delta_{\text{仪}}^2 + \Delta_{\text{估}}^2}$$

❖ **B类标准不确定度(68.3%)**

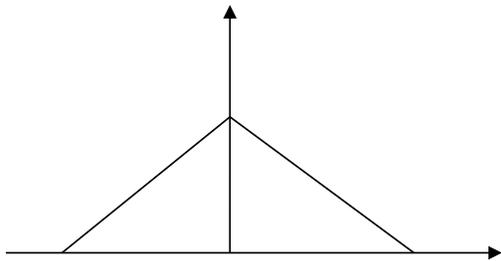
$$u_B = \frac{\Delta_B}{C}$$

# 置信系数C与仪器测量误差的分布概率有关



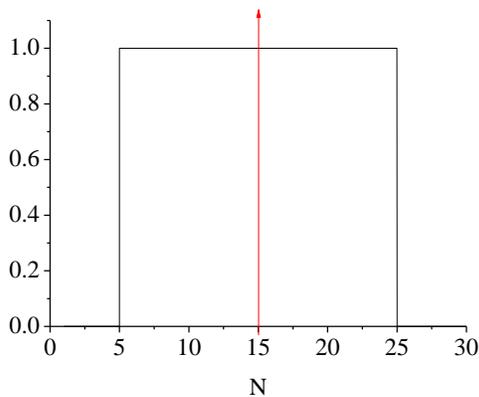
正态分布:

$$C = 3, [-u_B, u_B], P = 0.68$$



三角分布:

$$C = \sqrt{6}, [-u_B, u_B], P = 0.65$$



均匀分布:

$$C = \sqrt{3}, [-u_B, u_B], P = 0.58$$

## 几种常见仪器的误差分布与置信系数

仪器	米尺	游标卡尺	千分尺	物理天平	秒表
误差分布	正态	均匀	正态	正态	正态
置信系数C	3	$\sqrt{3}$	3	3	3

## ❖ B类展伸不确定度

$$k_P \frac{\Delta_B}{C}$$

P32

P	0.500	0.683	0.900	0.950	0.955	0.990	0.997
$k_P$ (正态分布)	0.68	1.00	1.65	1.96	2.00	2.58	3.00

## 不同分布测量仪器的置信概率P与置信因子 $K_p$

$K_p \backslash P$	0.500	0.577	0.650	0.683	0.900	0.950	0.955	0.990	0.997
正态分布	0.675			1.000	1.650	1.960	2.000	2.580	3.000
均匀分布	0.877	1.000		1.183	1.559	1.645	1.654	1.715	1.727
三角分布	0.717	0.862	1.000	1.064	1.675	1.901	1.929	2.204	2.315

合成标准不确定度  $U = \sqrt{u_A^2 + u_B^2}$

$P=0.68$

$$U_{0.68} = \sqrt{(t_{0.68}u_A)^2 + u_B^2} = \sqrt{(t_{0.68}u_A)^2 + (k_{0.68} \cdot \Delta_B / C)^2}$$

展伸不确定度

$$U_P = \sqrt{(t_P u_A)^2 + (k_P \Delta_B / C)^2}$$

相同置信概率的不确定度才可以按平方和来合成

$$U_{0.68} = \sqrt{\left(t_{0.68}u_A\right)^2 + \left(\frac{k_{0.68}\Delta_B}{C}\right)^2}$$

$$U_{0.95} = \sqrt{\left(t_{0.95}u_A\right)^2 + \left(\frac{k_{0.95}\Delta_B}{C}\right)^2}$$

$$U_{0.99} = \sqrt{\left(t_{0.99}u_A\right)^2 + \left(\frac{k_{0.99}\Delta_B}{C}\right)^2}$$

相同置信概率的不确定度才可以按平方和来合成

测量结果的表示:

$$X = \left( \bar{X} \pm U_{0.95} \right) \text{ 单位} \quad (P=0.95)$$

$$X = \left( \bar{X} \left( 1 \pm \frac{U_{0.95}}{\bar{X}} \times 100\% \right) \right) \text{ 单位} \quad (P=0.95)$$

如果没有标明置信水平，则默认P=0.95

例：用千分尺测量一个球的直径，测量了10次，结果如下：

$$\bar{D} = 12.345 \text{ mm} \quad n = 10$$

$$\sigma = 0.008 \text{ mm} \quad \Delta_B = 0.004 \text{ mm}$$

查表  $n = 10, P = 0.95$  时：

$$t_p = 2.26, k_p = 1.96$$

$$U_{0.95} = \sqrt{\left(2.26 \times \frac{0.008}{\sqrt{10}}\right)^2 + \left(1.96 \times \frac{0.004}{3}\right)^2} = 0.007 \text{ mm}$$

$$D = (12.345 \pm 0.007) \text{ mm} \quad (P = 0.95)$$

测量结果的表示

# 间接测量：不确定度的传递

间接测量物理量： $y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$

$$\Rightarrow U_P^2(y) = \sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial y}{\partial x_i} \right)^2 \cdot U_P^2(x_i)$$

前提条件： $x_1, x_2, \dots, x_n$  为独立测量量

# 推导不确定度传递公式流程

1. 对函数求全微分或先取对数再求微分
2. 合并同类项
3. 将微分符号改成不确定度符号
4. 各项平方和

$$\rho = \frac{m}{m - m_1} \rho_0$$

• 两边取对数得：

$$\ln \rho = \ln m + \ln \rho_0 - \ln(m - m_1)$$

• 求全微分得：

$$\frac{d\rho}{\rho} = \frac{dm}{m} + \frac{d\rho_0}{\rho_0} - \frac{d(m - m_1)}{m - m_1}$$

$$\frac{d\rho}{\rho} = \frac{dm}{m} + \frac{d\rho_0}{\rho_0} - \frac{dm}{m - m_1} + \frac{dm_1}{m - m_1}$$

• 合并同类项：

$$\frac{d\rho}{\rho} = \frac{-m_1 dm}{m(m - m_1)} + \frac{d\rho_0}{\rho_0} + \frac{dm_1}{m - m_1}$$

• 微分号变为不确定度符号，各项平方和：

$$\frac{u_\rho}{\rho} = \sqrt{\left[\frac{-m_1}{m(m - m_1)}\right]^2 u_m^2 + \frac{u_{\rho_0}^2}{\rho_0^2} + \left(\frac{1}{m - m_1}\right)^2 u_{m_1}^2}$$

# 常用函数不确定度传递公式

函数表达式

传递（合成）公式

$$W = x \pm y$$

$$U_W = \sqrt{U_x^2 + U_y^2}$$

$$W = x \cdot y$$

$$U_W/W = \sqrt{(U_x/x)^2 + (U_y/y)^2}$$

$$W = \frac{x}{y}$$

$$U_W/W = \sqrt{(U_x/x)^2 + (U_y/y)^2}$$

$$W = \frac{x^k y^n}{z^m}$$

$$U_W/W = \sqrt{k^2 (U_x/x)^2 + n^2 (U_y/y)^2 + m^2 (U_z/z)^2}$$

$$W = kx$$

$$U_W = kU_x, U_W/W = U_x/x$$

$$W = k\sqrt{x}$$

$$U_W/W = \frac{1}{2} U_x/x$$

$$W = \sin x$$

$$U_W = |\cos x| U_x$$

$$W = \ln x$$

$$U_W = \frac{U_x}{x}$$

## 最大不确定度（仅用于设计！）

在很多情况下,往往只需粗略估计不确定的大小,可采用较为保守的线性(算术)合成法则

$$\Delta W = \left| \frac{\partial f}{\partial x} \right| \cdot \Delta x + \left| \frac{\partial f}{\partial y} \right| \cdot \Delta y + \left| \frac{\partial f}{\partial z} \right| \cdot \Delta z + L$$

$$\frac{\Delta W}{W} = \left| \frac{\partial \ln f}{\partial x} \right| \cdot \Delta x + \left| \frac{\partial \ln f}{\partial y} \right| \cdot \Delta y + \left| \frac{\partial \ln f}{\partial z} \right| \cdot \Delta z + L$$

标准不确定度：  $L=2.35 \pm 0.01(\text{cm})$

最大不确定度：  $L=2.35 \pm 0.05(\text{cm})$

# 常用函数的最大不确定度算术合成公式

物理量的函数式	最大不确定度	相对不确定度
$W = x + y + z + L$	$\Delta x + \Delta y + \Delta z + L$	$\frac{\Delta x + \Delta y + \Delta z + L}{x + y + z + L}$
$W = x \pm y$	$\Delta x + \Delta y$	$\frac{\Delta x + \Delta y}{x \pm y}$
$W = kx$ ( $k$ 为常数)	$k\Delta x$	$\frac{\Delta x}{x}$
$W = xy$	$x\Delta y + y\Delta x$	$\frac{\Delta x}{x} + \frac{\Delta y}{y}$
$W = x^n, (n = 1, 2, 3, L)$	$nx^{n-1}\Delta x$	$n\frac{\Delta x}{x}$
$W = \frac{x}{y}$	$\frac{y\Delta x + x\Delta y}{y^2}$	$\frac{\Delta x}{x} + \frac{\Delta y}{y}$
$W = \sin x$	$\cos x\Delta x$	$\cot x\Delta x$
$W = \tan x$	$\frac{\Delta x}{\cos^2 x}$	$\frac{2\Delta x}{\sin 2x}$
$W = \ln x$	$\frac{\Delta x}{x}$	$\frac{\Delta x}{x \ln x}$

## 不确定度分析的意义

- 不确定度表征测量结果的可靠程度，反映测量的精密度。

小球直径：(12.345 ± 0.006) cm [12.339, 12.351] P=0.68

最大偏差：±0.018 cm P=1

- 根据对测量不确定度的要求设计实验方案，选择仪器和实验环境。
- 通过对不确定度大小及其成因的分析，找到影响实验精确度的原因并加以校正。

氢同位素的发现

## 氢同位素的发现

1913年纽约大学的科学家对纯水密度做了非常精密的测量，他们在报告中指出测量的不确定度为 $2 \times 10^{-7} \text{g/cm}^3$ ，而精制出的各种水样品的密度差不多有 $8 \times 10^{-7} \text{g/cm}^3$ 的变化，他们得出了各种纯水的密度是不一样的这一结论。这是证明同位素存在的最早的实验证据，引导科学家最终发现了氢的同位素氘和氚。

# 不确定度均分原理

在间接测量中，每个独立测量量的不确定度都会对最终结果的不确定度有贡献。如果已知各测量量之间的函数关系，可写出不确定度传递公式，并按均分原理，将测量结果的总不确定度**均匀分配**到各个分量中，由此分析各物理量的测量方法和使用的仪器，指导实验。

一般而言，这样做比较**经济合理**，对测量结果影响较大的物理量，应采用精确度较高的仪器，而对测量结果影响不大的物理量，就不必追求过高精度仪器。

测量圆柱体体积的例子

$$V = \frac{\pi}{4} D^2 h \quad D = 8\text{mm}; h = 32\text{mm}; \quad \text{要求: } \frac{\Delta V}{V} \leq 0.5\%$$

$$\Rightarrow \frac{\Delta V}{V} = \frac{2\Delta D}{D} + \frac{\Delta h}{h} \Rightarrow \begin{aligned} \frac{2\Delta D}{D} &\leq 0.25\% \\ \frac{\Delta h}{h} &\leq 0.25\% \end{aligned}$$

$$\Rightarrow \begin{aligned} \Delta D &\leq 0.01\text{mm} \\ \Delta h &\leq 0.08\text{mm} \end{aligned}$$

游标卡尺: 125mm/0.02mm,  $\Delta_{\text{仪}} = 0.02 \text{ mm}$

300mm/0.02mm,  $\Delta_{\text{仪}} = 0.05 \text{ mm}$

螺旋测微器: 25mm/0.01mm,  $\Delta_{\text{仪}} = 0.004 \text{ mm}$

$\Rightarrow$  高 $h$ 用游标卡尺测量  
直径 $D$ 用螺旋测微器测量

## 下周先上大课，再回实验室做实验

### 预习内容及要求：

- 从教学平台下载《绪论课预备实验》讲义，预习实验内容：“自由落体法测重力加速度”、“单摆法测重力加速度”。
- 请参考讲义附件“不确定度均分原理”写一份《单摆法测重力加速度》的实验方案设计作为预习。

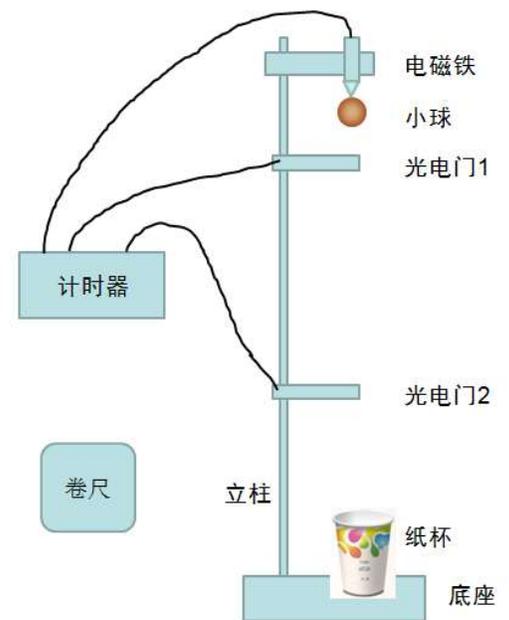
# 自由落体法测重力加速度

- 从起点开始下落距离不易测准

下落的起始和终止位置不明确

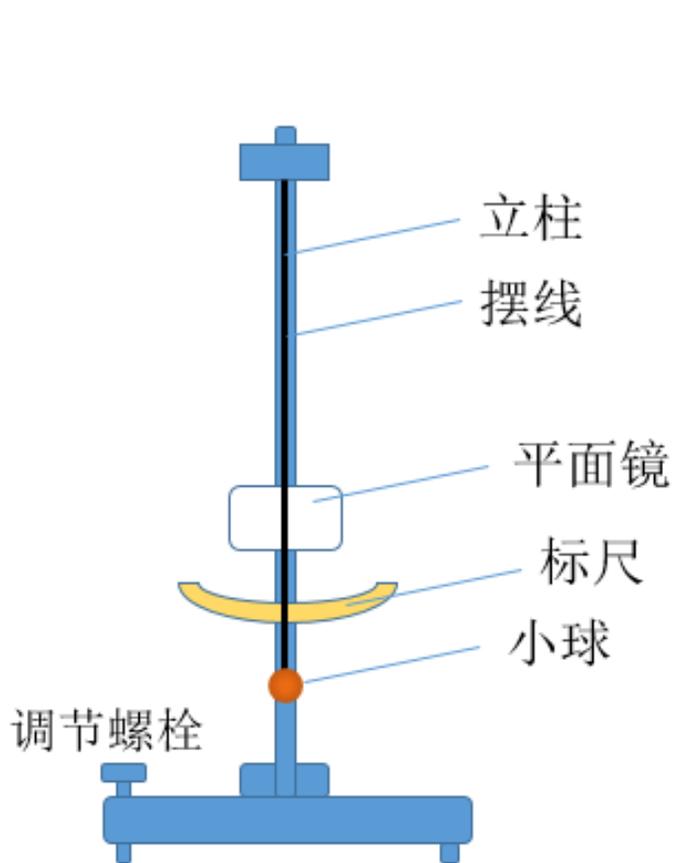
- 从起点开始下落时间不易测准

由于电磁铁有剩磁，因此小球下落的初始时间不准确



实验装置结构示意图

# 单摆法测重力加速度



单摆结构示意图

摆线长度调节旋钮      摆线锁紧螺钉



单摆实物图

# 单摆实验原理

线的质量 $\ll$ 小球的质量

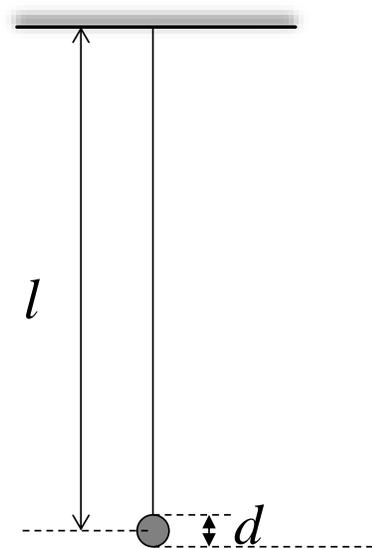
球的直径 $\ll$ 线的长度

**忽略：**空气阻力、浮力、线的伸长

**近似：**小摆角作简谐振动

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}} \quad \left(\frac{\Delta g}{g} < 1.0\%\right)$$

无质量细线  
系一质点

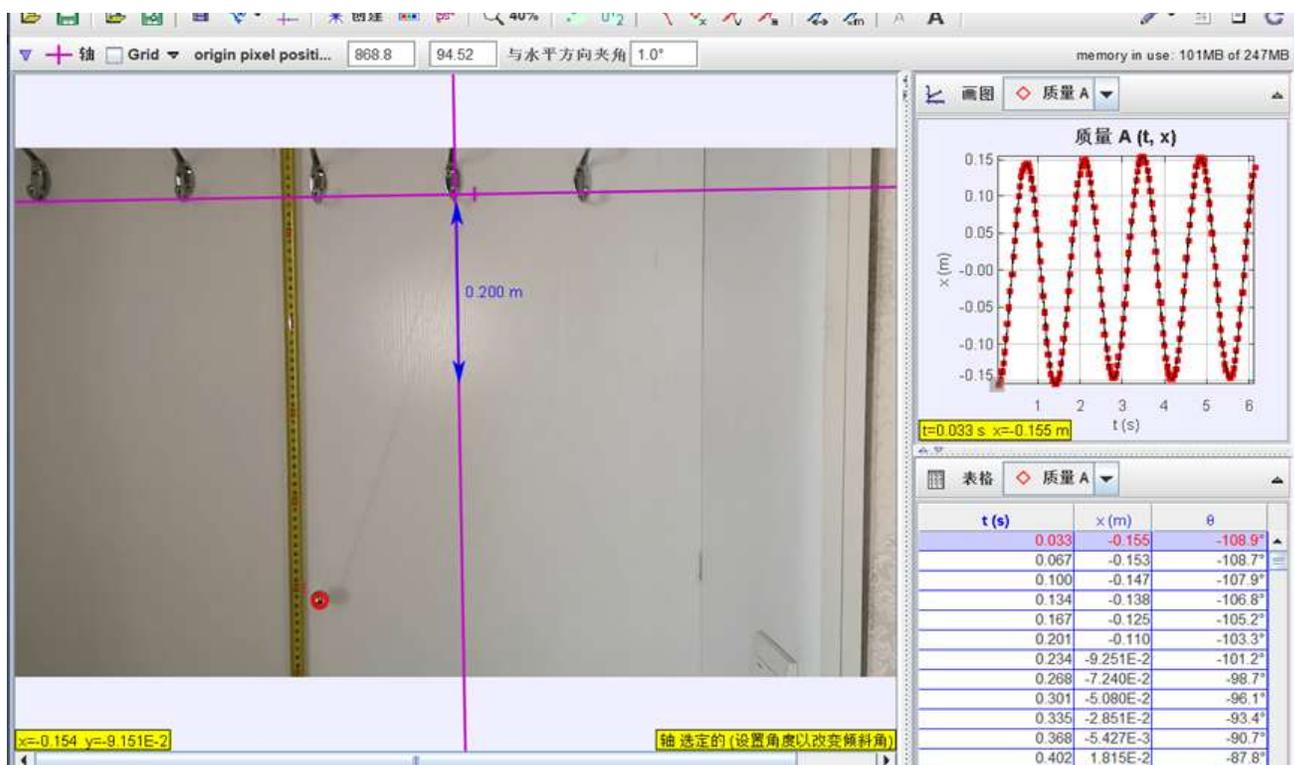


# 在实验方案设计中给出

- 利用不确定度均分原理设计的过程 ( $\Delta g/g < 1\%$ )
- 摆长至少需要多长？增加摆长是否可以提高测量精度？
- 摆长用什么仪器测量？需要用游标卡尺测量摆球直径吗？
- 至少需要测多少个周期？

# 单摆实验拓展

用 Tracker 软件追踪摆球运动轨迹，测量重力加速度。



注：仅供有兴趣的同学选做。

# 单摆实验拓展

视频追踪软件 Tracker及使用简介下载地址:

[https://jxzy.ustc.edu.cn/show\\_notice.aspx?id=216](https://jxzy.ustc.edu.cn/show_notice.aspx?id=216)

首页 >> 通知公告

## 线上物理实验软件工具

2020-3-23

phyphox（手机物理工坊）软件及使用简介:

1. phyphox（手机物理工坊）APP(Android版) (注：请大家下载解压后安装)
2. 手机物理工坊APP使用简介 PPT

视频追踪软件 Tracker及使用简介:

1. 视频追踪软件 Tracker-5.1.3 (Windows版)
2. 视频追踪与Tracker的使用 PPT
3. 影像追踪分析软件Tracker教程01
4. 影像追踪分析软件Tracker教程02
5. 影像追踪分析软件Tracker教程03

电子节拍器:

1. 电子节拍器



下周先上1小时绪论课，再回各自实验室完成两个预备实验。

从教学平台下载《绪论课预备实验》讲义

1. 预习“自由落体法测重力加速度”、“单摆法测重力加速度”。
2. 请参考讲义附件“不确定度均分原理”写一份《单摆法测重力加速度》的实验方案设计作为预习。

**实验方案设计在实验前提交；  
没有设计实验方案不能做实验！**

谢谢!

## 重力加速度的测量

重力加速度 $g$ 是指一个物体受重力作用时具有的加速度，也称自由落体加速度。20 世纪 70 年代初，国际上通过绝对重力的测量，建立了国际重力标准网（International Gravity Standardization Net, 简称 IGSN）。IGSN 在全球共有 1854 个点，平均精度小于  $10^{-7} m/s^2$ 。下表给出了一些城市的重力加速度值。

表 1 一些城市的重力加速度

城市	重力加速度 $m/s^2$	城市	重力加速度 $m/s^2$
新加坡	9.781	广州	9.788
上海	9.794	北京	9.801
纽约	9.803	巴黎	9.809
莫斯科	9.816	北极	9.832

地球上质量为  $m$  的物体受到万有引力  $F_{引}$  作用，由于地球自转， $F_{引}$  的一部分用于提供重力，另一部分用于提供向心力  $F_{向}$ ：

$$F_{向} = ma_{向} = m\omega^2(R+h) \cdot \cos\theta$$

式中地球平均半径  $R = 6370km$ ， $h$  为物体所处的海拔高度， $\theta$  为纬度。

重力加速度 $g$ 与物体所处的纬度、海拔高度及附近的矿藏分布等因素有关，并相继为实验所证实。纬度越大，重力加速度 $g$ 越大，海拔越高， $g$ 越小，但最大和最小值相差仅约 1/300。

由上式可知，赤道附近海平面处  $a_{向} = 0.0337 m/s^2$ ，因此物体所受的重力  $F$  约等于万有引力  $F_{引}$ ，可得重力加速度 $g$ ：

$$g = \frac{GM}{(R+h)^2}$$

式中  $G$  为引力常数， $M$  为地球质量。

由于地球不是完整的球形，精确测量重力加速度，特别是研究重力加速度的分布，在勘查地下资源、提高导弹和卫星精度等应用领域具有十分重要的意义。

# 1、自由落体法测重力加速度

## 待研究的问题

仅在重力作用下，物体由静止开始竖直下落的运动称为自由落体运动。本实验利用自由落体测量本地的重力加速度 $g$ 。

## 实验原理

根据牛顿运动定律，自由落体的运动方程为：

$$h = \frac{1}{2}gt^2 \quad (1)$$

其中 $h$ 是下落距离， $t$ 是下落时间。但在实际工作中， $t$ 的测量精度不高，利用(1)式很难精确测量重力加速度 $g$ 。

本实验用卷尺测 $h$ ，采用双光电门法测 $t$ ，其原理见图1。光电门1的位置固定，即小球通过光电门1时的速度 $v_0$ 保持不变，小球通过光电门1与光电门2的高度差为 $h_i$ ，时间差为 $t_i$ ，改变光电门2的位置，则有：

$$h_1 = v_0 t_1 + \frac{1}{2}gt_1^2$$

$$h_2 = v_0 t_2 + \frac{1}{2}gt_2^2$$

.....

$$h_i = v_0 t_i + \frac{1}{2}gt_i^2$$

两端同时除以 $t_i$ ：

$$\bar{v}_1 = \frac{h_1}{t_1} = v_0 + \frac{1}{2}gt_1$$

$$\bar{v}_2 = \frac{h_2}{t_2} = v_0 + \frac{1}{2}gt_2$$

.....

$$\bar{v}_i = \frac{h_i}{t_i} = v_0 + \frac{1}{2}gt_i$$

测出系列 $h_i$ 、 $t_i$ ，利用线性拟合可求出当地的重力加速度 $g$ 。

## 实验装置

自由落体实验装置见右图，立柱底座的调节螺栓用于调节竖直，立柱上端有一电磁铁，用于吸住小钢球。电磁铁一旦断电，小球即作自由落体运动。由于电磁铁有剩磁，因此小球下落的初始时间不准确（最大不确定度约20ms）。立柱上装有两个可上下移动的光电门，其位置可利用卷尺测量。数字毫秒计显示3个值，分别对应：从电磁铁断电到小球通过光电门1的时间差、从电磁铁断电到小球通过光电门2的时间差、小球通过两个光电门的时间差，单位为ms。

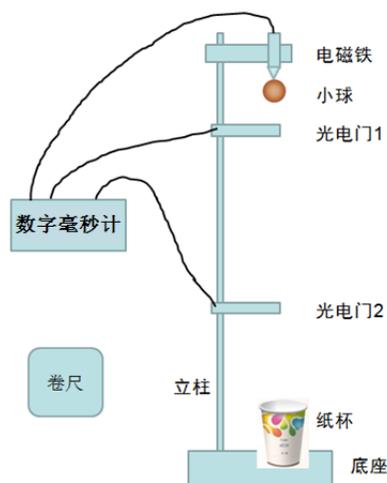


图 2.4-1 自由落体法测重力加速度

## 实验要求

请利用实验室提供的自由落体实验装置，自己设计原始数据表格，测量所在地的重力加速度 $g$ 。要求测6~8组数据（光电门2置于6~8个不同位置）。

实验完毕，整理实验装置，并打乱底座平衡。

利用线性拟合求出当地的重力加速度 $g$ （作图 + 最小二乘法拟合）。

## 思考题

1. 在实际工作中，为什么利用（1）式很难精确测量重力加速度 $g$ ？
2. 为了提高测量精度，光电门1和光电门2的位置应如何选取？
3. 利用本实验的装置，如何测量小球下落到某个位置的瞬时速度？
4. 利用本实验装置，你还能提出其他测量重力加速度 $g$ 的实验方案吗？

## 参考资料

1. 江美福、方建兴，大学物理实验教程，2009年，科学出版社

## 2、单摆法测重力加速度

### 待研究的问题

单摆实验是一个经典实验，许多著名的物理学家如伽利略、牛顿、惠更斯等都对单摆实验进行过细致的研究。伽利略发现了摆的等时性原理，指出摆的周期与摆长的平方根成正比，而与摆的质量和材料无关，为后来摆钟的设计与制造奠定了基础。1673年荷兰科学家惠更斯制造的惠更斯摆钟就运用了摆的等时性原理。摆的等时性原理应用于时钟上，作为稳定的“定时器”，使机械钟能够指示出“秒”，从而将计时精度提高了近100倍。

本实验利用经典的单摆周期公式和给出的实验器材设计一个合理的实验方案，测量本地的重力加速度 $g$ 。

### 实验原理

理想的单摆，是一根没有质量、没有弹性的线，系住一个没有体积的质点，在真空中由于重力作用而在与地面垂直的平面内做摆角趋于零的自由振动。这种理想的单摆，实际上是不存在的。在实际的单摆实验中，悬线是一根有质量（弹性很小）的线，摆球是有质量有体积的刚性小球，摆角不为零，摆球的运动还受到空气的影响。

单摆的周期公式为：

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g} \left[ 1 + \frac{d^2}{20l^2} - \frac{m_0}{12m} \left( 1 + \frac{d}{2l} + \frac{m_0}{m} \right) + \frac{\rho_0}{2\rho} + \frac{\theta^2}{16} \right]}$$

式中 $T$ 是单摆的周期， $l$ 、 $m_0$ 是单摆摆线的长度和质量， $d$ 、 $m$ 、 $\rho$ 是摆球的直径、质量和密度， $\rho_0$ 是空气密度， $\theta$ 是摆角。一般情况下，摆球几何形状、摆的质量、空气浮力、摆角（ $\theta < 5^\circ$ ）对 $T$ 的修正都小于 $10^{-3}$ 。若实验精度要求在 $10^{-3}$ 以内，则这些修正项都可以忽略不计，反之，则这些因素不可忽略。

在一级近似下，单摆周期公式为：

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}$$

通过测量周期 $T$ 、摆长 $l$ 可求出重力加速度 $g$ 。

## 实验装置

卷尺、游标卡尺、千分尺、电子秒表、单摆（带标尺、平面镜，摆线长度可调）。

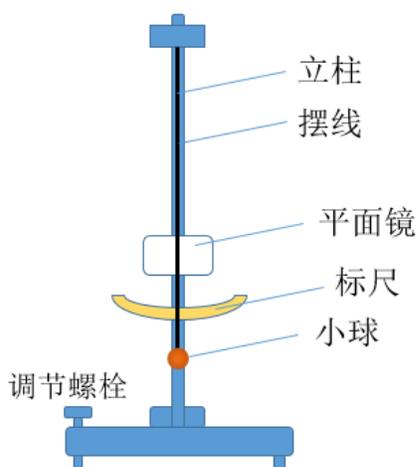


图 2.4-5 单摆测重力加速度实验装置

各装置的最大允差如下：

钢卷尺 $\Delta_{尺} \approx 0.2 \text{ cm}$ ；                游标卡尺 $\Delta_{卡} \approx 0.002 \text{ cm}$ ；

千分尺 $\Delta_{千} \approx 0.001 \text{ cm}$ ；                秒表 $\Delta_{秒} \approx 0.01 \text{ s}$ ；

根据统计分析，实验人员开启或停止秒表的反应时间为 0.1s 左右，所以实验人员测量时间的精度近似为 $\Delta_{人} \approx 0.2\text{s}$ 。

开始实验前，应调节螺栓使立柱竖直，并调节标尺高度，使其上沿中点距悬挂点 50cm。

## 实验要求

1. 参考附件“不确定度均分原理”，设计一个单摆装置，测量本地的重力加速度 $g$ ，要求测量精度 $\frac{\Delta g}{g} < 1\%$ ：

(1) 根据不确定度均分原理自行设计实验方案，合理选择测量仪器和方法。

(2) 根据设计方案，用单摆装置测量本地的重力加速度 $g$ 。

(3) 实验结束，打乱支架平衡、标尺及平面镜位置。

2. 对重力加速度 $g$ 的测量结果进行不确定度分析，检验实验结果是否达到设计要求。

### 实验方案设计要求：

实验设计方案需在实验前交给上课老师检查，没有设计实验方案不能做实验！

在实验方案设计中要包含以下内容：

1. 利用不确定度均分原理设计的过程（精度要求： $\Delta g/g < 1\%$ ）
2. 摆长至少需要多长？增加摆长是否可以提高测量精度？
3. 摆长用什么仪器测量？需要用游标卡尺测量摆球直径吗？
4. 至少需要测多少个周期？

### 思考题

1. 分析基本误差的来源，提出进行改进的方法。

### 参考资料

1. 吴泳华，霍剑青，浦其荣，大学物理实验（第一册 第二版），2005年，高等教育出版社

## 附件

### 不确定度均分原理

在间接测量中，每个独立测量量的不确定度都会对最终结果的不确定度有贡献。如果已知各物理量之间的函数关系，可写出不确定度传递公式，并将测量结果的总不确定度均匀分配到各个测量量中，由此分析各物理量的测量方法和使用的仪器，以指导实验，这就是不确定度均分原理。一般而言，这样做比较经济合理，对测量结果影响较大的物理量，应采用精度较高的仪器，而对影响结果影响不大的物理量，就不必追求高精度的仪器。下面以如何测量圆柱体的体积为例，进一步说明不确定度均分原理。

圆柱体的体积  $V$  可通过分别测量其直径  $D$  和高度  $h$  来得到。粗测其直径  $D$  约为  $8.0\text{mm}$ ，高  $h$  约为  $32.0\text{mm}$ 。若要求  $\frac{\Delta V}{V} \leq 0.5\%$ ，应怎样选择测量仪器？

**解：** 由于  $V = \frac{\pi}{4} D^2 h$ ，按最大不确定度公式估算，有

$$\frac{\Delta V}{V} = 2 \frac{\Delta D}{D} + \frac{\Delta h}{h}$$

根据不确定度均分原理有  $2 \frac{\Delta D}{D} \leq 0.25\%$ ， $\frac{\Delta h}{h} \leq 0.25\%$ ，将  $D$  和  $h$  的粗测值代入有：

$$\Delta D \leq 0.01\text{mm}, \quad \Delta h \leq 0.08\text{mm}$$

考虑到千分尺的最大允差为  $0.004\text{mm}$ ，游标卡尺的最大允差为  $0.02\text{mm}$ ，钢板尺的最大允差为  $0.1\text{mm}$ ，所以测量圆柱体的直径应选用千分尺，测量圆柱体的高应选用游标卡尺。

## 基本物理量的测量：长度

长度是物理学中的七个基本物理量之一。对长度的测量广泛应用于日常生产和生活中，其尺度范围小到基本粒子 ( $<10^{-15}$  米)，大到宇宙空间 ( $>10^{24}$  米)，并随着人类探索自然界的步伐而不断得以拓展。

为了方便交流，人们测量长度时需要建立一个标准，在 SI 制中，长度的单位是米。1983 年第 17 届国际计量大会通过了米的新标准：

1 米是真空中光在 ( $1/299792458$ ) 秒内所走过的距离。

人们测量长度实际上就是统一用“米”这把“尺子”去度量空间，并在实践中陆续发明了许多测量长度的工具，如可用于观测原子的原子力显微镜、扫描隧道显微镜，生活中常见的各种刻度尺，进行大尺度测量时常用的激光测距仪等等。测量长度的仪器设备种类繁多，在此不一一列举，仅介绍大学物理实验中常用的几种长度测量仪器：游标卡尺、千分尺、读数显微镜。

### 1. 游标卡尺

游标卡尺是一种测量外径、内径、宽度、厚度、深度等长度量的量具，其量程有 150mm、300mm 等几种，结构示意图如上图，主体部分由主尺和沿主尺滑动的游标构成。

游标卡尺的主尺最小刻度为 1mm，游标根据分格数的不同可分为十分度、二十分度、五十分度三种。以十分度游标卡尺为例，游标上有 10 个均匀的刻度分格共 9mm，即每个分格与主尺的最小分格相差 0.1mm，这就是十分度游标卡尺的游标分度值。从主尺刻度与游标的刻度“0”对齐开始向右滑动游标，当游标的刻度“1”与主尺的刻度对齐时，游标刚好滑动了 0.1mm；当游标的刻度“2”与主尺的刻度对齐时，游标刚好滑动了 0.2mm；依此类推，根据与主尺刻度对齐的游标刻度数乘以游标分度值即可测出 0.1~0.9 mm 的长度量，即十分度游标卡尺精度为 0.1mm。

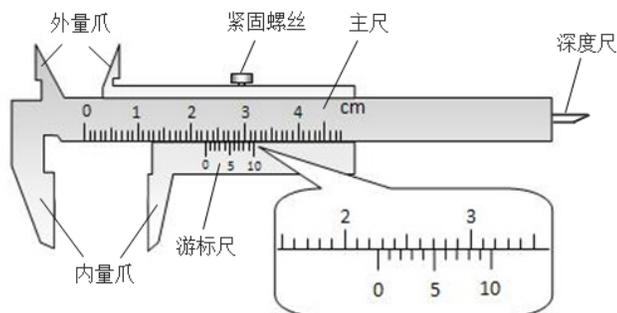


图 2.4-2 游标卡尺示意图

类似地，二十分度、五十分度游标卡尺的精度分别为 0.05mm、0.02mm。

用游标卡尺测量长度时，以右手持游标卡尺为例，先以游标的刻度“0”为参考，根据其左侧最近邻的主尺刻度值读出待测量的毫米值，再根据与主尺刻度对齐的游标刻度得到小数数值，最后将二者合起来就是待测的长度值，测量结果不需要估读。

另外，使用游标卡尺前应闭合量爪，检查主尺和游标的刻度“0”能否重合，若不能重合，应在测量时进行零点修正。

## 2. 千分尺

千分尺也叫螺旋测微器，量程有 25mm、50mm、75mm 等几种，常见的精度为 0.01mm，加上估读位，可读到千分位，是比游标卡尺更精密的长度测量仪器。

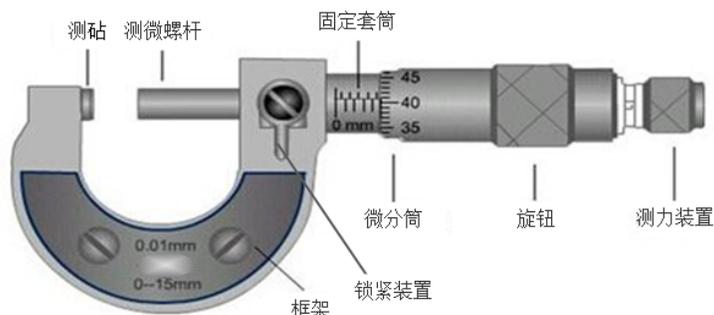


图 2.4-3 千分尺示意图

千分尺的结构如上图，U 型尺身的一侧有刚性连接的测砧，另一侧是螺纹间距为 0.5mm 的测微螺杆及与螺杆精密配合的固定套筒，固定套筒上有一条与轴线平行的刻度线，两侧分别标注整毫米和半毫米刻度，同时这条刻度线也充当微分筒的读数基准。微分筒与测微螺杆相连，其边缘是读取整毫米和半毫米值的基准。根据螺旋推进原理，微分筒每转一圈时，测微螺杆刚好移动 0.5mm，在微分筒圆周表面均匀刻有 50 个分度，每转一个分度，测微螺杆就移动  $0.5\text{mm}/50=0.01\text{mm}$ ，因此千分尺的分度值为 0.01mm。

用千分尺测量长度时，可分四步读数：首先读整毫米数，可根据固定套筒上与微分筒边缘最近邻的刻度读出该值；其次读半毫米数，若微分筒边沿与最近邻整毫米刻度之间出现了半毫米刻度，则半毫米数取 0.5mm，反之，半毫米数为 0mm；第三步读小数值，以固定套筒上的刻度线为基准，读出微分筒上的刻度值（含估读位）并乘以千分尺的分度值，得到小数部分的值；最后，将以上三个读数相加，即为千分尺的测量结果。

需要注意的是，使用千分尺前，应闭合测微螺杆，检查固定套筒上的刻度线与微分筒的“0”刻度能否对齐，若不能对齐，应进行零点修正。此外，为避免损坏测微螺杆的螺纹，只能缓慢转动千分尺末端的测力装置（棘轮旋钮），当听到 2~3 声“吱吱”的声音时，应立即停止转动棘轮，并开始读数。

### 3. 读数显微镜

读数显微镜是将用于观察的显微镜和用于测量长度的螺旋测微装置结合起来，用于测量长度的精密仪器。

读数显微镜的螺旋测微装置原理与千分尺相同。测微螺杆的螺距为 1mm，对应测微鼓轮转动一周。测微鼓轮的圆周刻有 100 个分度，因此读数显微镜的分度值为 0.01mm。使用测微装置时，先从标尺读出整毫米数，再从测微鼓轮读出小数（估读到千分位），二者相加作为测量值。

与测微螺杆配合的套管上装有显微镜，转动测微鼓轮时，显微镜可随螺旋测微装置左右移动。显微镜由物镜、目镜、目镜焦平面的十字叉丝、调焦手轮及反光镜等部分组成。叉丝中的一条平行于显微镜筒的平移方向，另一条垂直于显微镜筒移动方向，作为观测的基准线。



图 2.4-4 读数显微镜

读数显微镜的使用步骤：

- 1) 将待测物放置在显微镜工作台，调整反光镜角度，得到适当的视场亮度；
- 2) 转动调焦手轮，使待测物成像清晰；
- 3) 转动测微鼓轮，使叉丝对准待测物上的参考点，并记下此时的读数。继续转动鼓轮，使叉丝对准下一个参考点，再次记下读数。
- 4) 两个读数之差即为待测的长度值。

为了避免回程差，测量时应记住鼓轮的转动方向，只能向同一个方向转动，若超过了参考点，应重新测量。

## 基本物理量的测量：时间

时间是物理学的基本物理量之一，许多物理量的测量都离不开对时间的测量。在国际单位制中，时间的单位是秒。1967年10月举行的第13届国际计量大会通过了对秒的最新定义，标志着人类进入了原子时。该定义为：

1秒是指铯-133原子基态的两个超精细能级间所对应辐射的9 192 631 770个周期的持续时间。

时间包含时刻和时间间隔两个概念。在大学物理实验中，主要涉及利用电子秒表、数字毫秒计等装置对时间间隔进行测量。

### (1) 电子秒表

电子秒表是常见的电子计时装置，其机芯由集成电路组成，用石英晶体振荡器作时标，液晶显示窗一般用六位数字显示时间，可连续累积计时59'59.99s，分辨率为0.01s。

### (2) 数字毫秒计

数字毫秒计主要由集成元件和高频石英晶体振荡器构成，石英晶体作为时间信号发生器，不断产生标准的时基信号，与光电门配合计时，组成较精确的计时装置，其分辨通常为0.1ms，计时误差小于0.5ms。

(张宪锋、熊永红)

# 固体比热容的测量

19 世纪，随着工业文明的建立与发展，特别是蒸汽机的诞生，量热学有了巨大的进展。经过多年的实验研究，人们精确地测定了热功当量，逐步认识到不同性质的能量（如热能、机械能、电能、化学能等）之间的转化和守恒这一自然界物质运动的最根本的定律，成为 19 世纪人类最伟大的科学进展之一。从今天的观点看，量热学是建立在“热量”或“热质”的基础上的，不符合分子动理论的观点，缺乏科学内含。但这无损量热学的历史贡献。至今，量热学在物理学、化学、航空航天、机械制造以及各种热能工程、制冷工程中都有广泛的应用。

比热容是单位质量的物质升高（或降低）单位温度所吸收（或放出）的热量。交换是难免的。因此要努力创造一个热力学孤立体系，同时对实验过程中的其他吸热、散热做出校正，尽量使二者相抵消，以提高实验的精度。

## 实验原理

### 1. 混合法测比热容

设一个热力学孤立体系中有  $n$  种物质，其质量分别为  $m_i$ ，比热容为  $c_i$  ( $i=1,2,\dots,n$ )。开始时体系处于平衡态，温度为  $T_1$ ，与外界发生热量交换后又达到新的平衡态，温度为  $T_2$ 。若体系中无化学反应或相变发生，则该体系获得（或放出）的热量为

$$(1)$$

假设量热器和搅拌器的质量为  $m_1$ ，比热容为  $c_1$ ，开始时量热器与其内质量为  $m$  的水具有共同温度  $T_1$ ，把质量为  $m_x$  的待测物加热到  $T'$  后放入量热器内，最后这一系统达到热平衡，终温为  $T_2$ 。如果忽略实验过程中对外界的散热或吸热，则有

$$(2)$$

式中  $c$  为水的比热容。

代表温度计的热容量，其中  $V$  是温度计浸入到水中的体积。

### 2. 系统误差的修正

在量热学实验中，由于无法避免系统与外界的热交换，实验结果总是存在系统误差，有时甚至很大，以至无法得到正确结果。所以，校正系统误差是量热学实验中很突出的问题。为此可采取如下措施：

- (1) 要尽量减少与外界的热量交换，使系统近似孤立体系。此外，量热器不要放在电炉旁和太阳光下，实验也不要再在空气流通太快的地方进行。
- (2) 采取补偿措施，就是在被测物体放入量热器之前，先使量热器与水的初始温度低于室温，但避免在量热器外生成凝结水滴。先估算，使初始温度与室温的温差与混合后末温高出室温的

温度大体相等。这样混和前量热器从外界吸热与混合后向外界放热大体相等，极大地降低了系统误差。

- (3) 缩短操作时间，将被测物体从沸水中取出，然后倒入量热器筒中并盖好的整个过程，动作要快而不乱，减少热量的损失。
- (4) 严防有水附着在量热筒外面，以免水蒸发时带走过多的热量。
- (5) 沸点的校正。在实验中，我们是取水的沸点为被测物体加热后的温度，但压强不同，水的沸点也有所不同。为此需用大气压强计测出当时的气压，再由气压与沸点的关系通过表 5.3.3-1 查出沸点的温度。

在采取以上措施后，散热的影响仍难以完全避免。被测物体放入量热器后，水温达到最高温度前，整个系统还会向外散热。所以理论上的末温是无法得到的。这就需要通过实验的方法进行修正：在被测物体放入量热器前 4~5min 就开始测读量热器中水的温度，每隔 1min 读一次。当被测物体放入后，温度迅速上升，此时应每隔 0.5min 测读一次。直道升温停止后，温度由最高温度均匀下降时，恢复每分钟记一次温度，直到第 15min 截止。由实验数据作出温度和时间的关系  $T-t$  曲线（图 5.3.3-1）。

为了推出式（2）中的初温  $T_1$  和末温  $T_2$ ，在图 5.3.3-1 中，对应于室温  $T_{室}$  曲线上之 G 点作一垂直于横轴的直线。然后将曲线上升部分 AB 及下降部分 CD 延长，与此垂线分别相交于 E 点和 F 点，这两个交点的温度坐标可看成是理想情况下的  $T_1$  和  $T_2$ ，即相当于热交换无限快时水的初温与

末温。

## 实验内容

基础内容

测量锌粒的比热容，实验装置如图 5.3.3-2。

1. 称出质量为  $m_x$  的锌粒，放入试管中隔水加热（注意：水不能溅入）。在沸水中至少 15min，才可以认为锌粒与水同温。水沸腾后测出大气压强  $p$ 。
2. 在锌粒加热的同时，称出量热器内筒及搅拌器质量  $m_1$ ，然后倒入适量的水，并加入冰屑使水温降低到室温下 3~4℃（注意：不能使筒外表有水凝结），利用公式（2）估算出水的质量  $m$  后，称出质量  $m_1+m$ 。
3. 在倒入锌粒前，一面用棒轻轻搅动，一面每隔一分钟测一次水温（注意：一定要待冰屑全部融化后才能开始测温），计时 5 分钟后将热好的锌粒迅速而准确地倒入量热器内（注意：不能使量热器中水溅出，又切勿碰到温度计），立即将盖盖好并继续搅拌（注意：搅拌不能太使劲），同时，每隔半分钟测一次水温。至水温均匀下降，每隔一分钟测一次水温，连续 10min 左右为止。
4. 温度计浸没在水下的体积可用一个小量筒测得，先将水注入小量筒中，记下其体积  $V_1$ ，然后将温度计插入水中，使温度计插入水中的体积与在量热筒中没入水中的体积相同（以从量热筒中取出温度计上水印为准），读出液面升高后的体积  $V_2$ ，则温度计插入量热筒水中的体积

(注意：实验中温度计中的水银泡一定要没入水中，但又不能碰到锌粒)

5. 查表 5.3.3-1 得到实验气压条件下水的沸点  $T'$ ，即作为锌粒加热后的温度。
6. 作温度-时间曲线，求出  $T_1$  和  $T_2$ 。
7. 根据式 (2) 求出锌的比热  $c_x$ ，并和锌的标准比热比较，求出相对误差。

提高内容

用冷却法测量金属的比热容

进阶内容

利用现有仪器测量冰的熔解热。

高阶内容

设计一种测量液体比热容的方法。

**思考题**

为使系统从外界吸热与向外界放热大体相抵，你采取了哪些措施？结果怎样？



# 冷却法金属比热容测量仪使用说明

## 一、概述

本冷却法金属比热容测量仪中的加热装置、金属样品室及金属样品的温度的测量装置与以往仪器相比，进行了较大的改进和提高。测量试样温度采用常用的铜-康铜做成的热电偶，当冷端为冰点时，测量热电偶热电势差的二次仪表由高灵敏、高精度、低漂移的放大器和三位半数字电压表组成，数字电压表显示的mV数对应待测温度值。加热装置可自由升降和左右移动。被测样品安放在有较大容量的防风圆筒内即样品室，其作用保持高于室温的样品自然冷却。这样结果重复性好，可以减少测量误差，提高实验准确度。本仪器可测量金属在室温到200℃温度时，各种温度的比热容。本实验仪可用于高校基础物理实验和设计性、综合性物理实验。

## 二、实验仪器

图1 冷却法金属比热容测定仪装置图

其中 A) 热源, 采用 75 瓦电烙铁改制而成, 利用底盘支撑固定并可上下移动; B) 实验样品, 是直径 5mm, 长 30mm 的小圆柱, 其底部钻一深孔便于安放热电偶, 而热电偶的冷端则安放在冰水混合物内; C) 铜-康铜热电偶; D) 热电偶支架; E) 防风容器; F) 三位半数字电压表, 显示用三位半面板表; G) 冰水混合物。

## 三、技术指标

- 1、数字电压表：三位半，量程：0-20mV，分辨率：0.01mV，准确度：±0.3%。
- 2、加热器功率：75W。
- 3、传感器采用铜-康铜热电偶。
- 4、测量金属在 100℃ 时的比热容与公认值百分差小于 5%。

5、输入交流电压：220V±10%。

6、电源功率约：90W。

7、重量：7.5Kg。

#### 四、实验项目

1、用铜-康铜热电偶测量物体的温度

2、用冷却法测量金属的比热容

#### 五、注意事项

1、实验过程中防止烫伤。

2、实验过程中尽量避免接触加热器和加热器电源线，以免发生触电。

## 冷却法金属比热容测量

实验目的：

1、学会用铜-康铜热电偶测量物体的温度，学会用冷却法测量金属比热容。

2、已知铜在 100℃ 的比热容，用冷却法测量铝和铁在 100℃ 的比热容。

实验原理：

根据牛顿冷却定律，用冷却法测定金属的比热容是量热学中常用方法之一。若已知标准样品在不同温度的比热容，通过作冷却曲线可测量各种金属在不同温度时的比热容。本实验以铜为标准样品，测定铁、铝样品在 100 或 200 时的比热容。通过实验了解金属的冷却速率和它与环境之间的温差关系以及进行测量的实验条件。单位质量的物质，其温度升高 1K(1 )所需的热量叫做该物质的比热容，其值随温度而变化。将质量为  $M_1$  的金属样品加热后，放到较低温度的介质(例如：室温的空气)中，样品将会逐渐冷却。其单位时间的热量损失( )与温度下降的速率成正比，于是得到下述关系式：

$$(1)$$

(1)式中  $C_1$  为该金属样品在温度 时的比热容， 为金属样品在 时的温度下降速率。根据冷却定律有：

$$(2)$$

(2)式中  $a_1$  为热交换系数， $S_1$  为该样品外表面的面积， $m$  为常数， 为金属样品的温度， 为周围介质的温度。由式(1)和(2)，可得：

(3)

同理，对质量为  $M_2$ ，比热容为  $C_2$  的另一种金属样品，可有同样的表达式：

(4)

由上式(3)和(4)，可得：

所以：

如果两样品的形状尺寸都相同，即  $S_1=S_2$ ；两样品的表面状况也相同(如涂层、色泽等)，而周围介质(空气)的性质当然也不变，则有  $a_1=a_2$ 。于是当周围介质温度不变(即室温 恒定而样品又处于相同温度 = )时，上式可以简化为：

(5)

如果已知标准金属样品的比热容  $C_1$  质量  $M_1$ ；待测样品的质量  $M_2$  及两样品在温度 时冷却速率之比，就可以求出待测的金属材料的比热容  $C_2$ 。

几种金属材料的比热容见表 1：

表 1

比热容 温度	$C_{Fe}$ (cal/(g ))	$C_{Al}$ (cal/(g ))	$C_{Cu}$ (cal/(g ))
100	0.110	0.230	0.0940

实验仪器：

本仪器主要由热源(采用 75 瓦电烙铁改制而成，利用底盘支撑固定并可上下移动)、实验样品(直径 5mm，长 30mm 的小圆柱，其底部钻一深孔便于安放热电偶，而热电偶的冷端则安放在冰水混合物内)、铜-康铜热电偶、热电偶支架、防风容器、三位半数字电压表、冰水混合物组成

## 实验内容

### 1. 基础部分

- 1) 用铜-康铜热电偶测量温度，而热电偶的热电势采用温漂极小的放大器和三位半数字电压表，经信号放大后输入数字电压表显示的满量程为 20mV，读出的 mV 数查表即可换算成温度。
- 2) 选取长度、直径、表面光洁度尽可能相同的三种金属样品(铜、铝)用物理天平或电子天平称出它们的质量  $M_0$ 。
- 3) 使热电偶热端的铜导线与数字表的正端相连；冷端铜导线与数字表的负端相连。当数字电压表读数为某一特定值即 200 时，切断电源，样品继续安放在与外界基本隔绝的金属圆筒内自然冷却(筒口须盖上盖子)。当温度降到接近 102 时开始记录，测量样品由 102 下降到 98 所需要时间。分别测量其温度下降速度，每一样品重复测量 3 次。因为各样品的温度下降范围相同( )所以公式(5)

可以简化为：

- 4) 求出铝和铁 100 度时的比热，并和铝、铁 100 度的标准比热容比较，求出相对误差。

### 2. 提高部分

设计一种方法测量铝的比热容，并当堂验证能否提高测量结果的精度。

### 3. 进阶部分

用混合法测锌粒的比热容

### 附录：

国产的康铜丝，各厂生产成分配方和工艺略有不同，因而制成的铜-康铜热电偶在 100 温度时(参考 0 )，测量的温差电势差有 4.10mV 和 4.25mV 等几种，用户使用时须自己定标，以下铜-康铜热电偶热势差表仅供参考(引自国家计量局，中华人民共和国，国家计量检定规程汇编，温度(一)，中国计量出版社，1987)。

热 电 动 势 (mV)												
0	0.000	0.039	0.078	0.117	0.156	0.195	0.234	0.273	0.312	0.351	0.391	0
10	0.391	0.430	0.470	0.510	0.549	0.589	0.629	0.669	0.709	0.749	0.789	10
20	0.789	0.830	0.870	0.911	0.951	0.992	1.032	1.073	1.114	1.155	1.196	20
30	1.196	1.237	1.279	1.320	1.361	1.403	1.444	1.486	1.528	1.569	1.611	30
40	1.611	1.653	1.695	1.738	1.780	1.822	1.865	1.907	1.950	1.992	2.035	40
50	2.035	2.078	2.121	2.164	2.207	2.250	2.294	2.337	2.380	2.424	2.467	50
60	2.467	2.511	2.555	2.599	2.643	2.687	2.731	2.775	2.819	2.864	2.908	60
70	2.908	2.953	2.997	3.042	3.087	3.131	3.176	3.221	3.266	3.312	3.357	70
80	3.357	3.402	3.447	3.493	3.538	3.584	3.630	3.676	3.721	3.767	3.813	80
90	3.813	3.859	3.906	3.952	3.998	4.044	4.091	4.137	4.184	4.231	4.277	90
100	4.277	4.324	4.371	4.418	4.465	4.512	4.559	4.607	4.654	4.701	4.749	100
110	4.749	4.796	4.844	4.891	4.939	4.987	5.035	5.083	5.131	5.179	5.227	110
120	5.227	5.275	5.324	5.372	5.420	5.469	5.517	5.566	5.615	5.663	5.712	120
130	5.712	5.761	5.810	5.859	5.908	5.957	6.007	6.056	6.105	6.155	6.204	130
140	6.204	6.254	6.303	6.353	6.403	6.452	6.502	6.552	6.602	6.652	6.702	140
150	6.702	6.753	6.803	6.853	6.903	6.954	7.004	7.055	7.106	7.156	7.207	150
160	7.207	7.258	7.309	7.360	7.411	7.462	7.513	7.564	7.615	7.666	7.718	160
170	7.718	7.769	7.821	7.872	7.924	7.975	8.027	8.079	8.131	8.183	8.235	170
180	8.235	8.287	8.339	8.391	8.443	8.495	8.548	8.600	8.652	8.705	8.757	180
190	8.757	8.810	8.863	8.915	8.968	9.021	9.074	9.127	9.180	9.233	9.286	190
200	9.286	9.339	9.392	9.446	9.499	9.553	9.606	9.659	9.713	9.767	9.830	200

分度号: CK

**铜-康铜热电偶分度表** (参考端温度为 0 )

# 分光计的调节与使用

## 实验要求：

### 1. 预习阶段

- (1) 请提前预习实验室的两个实验。
- (2) 阅读实验讲义，完成预习题目：<https://ks.wjx.top/vj/ezcDzf2.aspx>

### 2. 实验阶段

- (1) 维护良好的课堂秩序，在实验室内尽量保持安静。
- (2) 维护整洁的实验环境，不要将水杯等放在试验台上，不得在实验室内吃口香糖。
- (3) 爱护实验设备，轻拿轻放。在老师讲解后才能动手操作。并且在动手前应仔细阅读实验注意事项和操作说明。
- (4) 如实记录实验数据，不得篡改、抄袭。
- (5) 实验数据经指导老师签字、实验设备整理好后方可离开。

### 3. 报告撰写阶段

- (1) 本实验要求计算三棱镜的折射率及其不确定度。
- (1) 完成讲义中的思考题 1。

## 注意事项：

### 1. 爱护光学元件

光学实验中使用的的大部分光学元件是玻璃制成的，光学表面经过精心抛光。使用时要轻拿、轻放，避免碰撞、损坏元件。任何时候都不要用手触及光学表面（镀膜片或光在此表面反射或折射），只能拿磨砂面（光线不经过的面一般都磨成毛面，如透镜的侧面，棱镜的上下底面等），不要对着光学元件表面说话、咳嗽、打喷嚏等。

**2. 汞灯需提前预热 10 分钟，实验过程中不要关闭，不要震动。若关闭，需等完全冷却下来才能再次开启。**

分光计是精确测定光线偏转角的仪器，也称测角仪。光学中的许多基本量如波长，折射率等都可以直接或间接地表现为光线的偏转角，因而利用它可测量波长、折射率，此外还能精确的测量光学平面间的夹角。许多光学仪器（棱镜光谱仪、光栅光谱仪、分光光度计、单色仪等）的基本结构也是以它为基础的，所以分光计是光学实验中的基本仪器之一。使用分光计时必须经过一系列的精细调整才能得到精确的结果，它的调整技术是光学实验的基本技术之一，必须正确掌握。本实验的目的就在于着重训练分光计的调整技术和技巧，并用它来测量三棱镜的顶角和最小偏向角，求得三棱镜的折射率。

## 实验原理

### 1. 分光计的结构

分光计主要由底座、平行光管、望远镜、载物台和读数圆盘五部分组成。外形如图 7.1.2-1 所示。

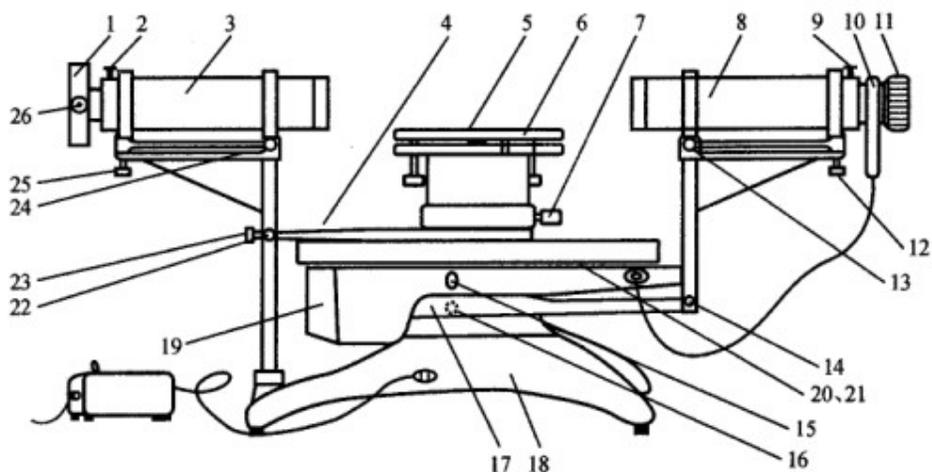


图 7.1.2-1 分光计外形图

1—狭缝装置;2—狭缝装置锁紧螺钉;3—平行光管;4—制动架(二);5—载物台;6—载物台调节螺钉(3只);7—载物台锁紧螺钉;8—望远镜;9—目镜锁紧螺钉;10—阿贝式自准直目镜;11—目镜调节手轮;12—望远镜仰角调节螺钉;13—望远镜水平调节螺钉;14—望远镜微调螺钉;15—转座与刻度盘止动螺钉;16—望远镜止动螺钉;17—制动架(一);18—底座;19—转座;20—刻度盘;21—游标盘;22—游标盘微调螺钉;23—游标盘止动螺钉;24—平行光管水平调节螺钉;25—平行光管仰角调节螺钉;26—狭缝宽度调节手轮

- (1) 底座——中心有一竖轴，望远镜和读数圆盘可绕该轴转动，该轴也称为仪器的公共轴或主轴。
- (2) 平行光管——是产生平行光的装置，管的一端装一会聚透镜，另一端是带有狭缝的圆筒，狭缝宽度可以根据需要调节。
- (3) 望远镜——观测用，由目镜系统和物镜组成，为了调节和测量，目镜和物镜之间还装有分划板，它们分别置于内管、外管和中管内，三个管彼此可以相互移动，也可以用螺钉固定。参看图 7.1.2-2，在中管的分划板下方紧贴一块  $45^\circ$  全反射小棱镜，棱镜与分划板的粘贴部分涂成黑色，仅留一个绿色的小十字窗口。光线从小棱镜的另一直角

边入射，从45°反射面反射到分划板上，透光部分便形成一个在分划板上的明亮的十字窗。

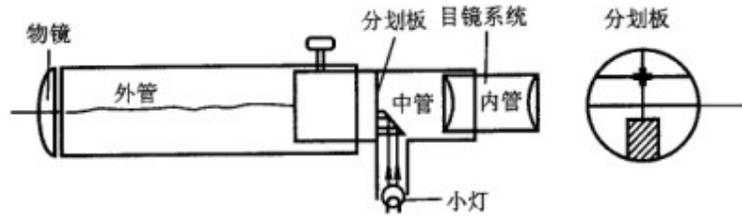


图 7.1.2-2 望远镜结构

- (4) 载物台——放平面镜、棱镜等光学元件用。台面下三个螺钉可调节台面的倾斜角，平台的高度可旋松螺钉(7)升降，调到合适位置再锁紧螺钉。
- (5) 读数圆盘——是读数装置。由可绕仪器公共轴转动的刻度盘和游标盘组成。度盘上刻有720等分刻线，格值为0.5度(30′)。在游标盘对称方向设有两个角游标。这是因为读数时，要读出两个游标处的读数值，然后取平均值，这样可消除刻度盘和游标盘的圆心与仪器主轴的轴心不重合所引起的偏心误差。

读数方法与游标卡尺相似，这里读出的是角度。读数时，以角标零线为准，读出刻度盘上的度值，再找游标上与刻度盘上刚好重合的刻线为所求之分值。如果游标零线落在半度刻线之外，则读数应加上30′。

## 2. 分光计的调整原理和方法

调整分光计，最后要达到下列要求：

- ① 平行光管发出平行光；
- ② 望远镜对平行光聚焦（即接收平行光）；
- ③ 望远镜、平行光管的光轴垂直仪器公共轴。

分光计调整的关键是调好望远镜，其他的调整可以以望远镜为基准。

### (1) 调整望远镜

#### 1) 目镜调焦

这是为了使眼睛通过目镜能清楚地看到图 7.1.2-3 所示分划板上的刻线。调焦方法是把目镜调焦手轮轻轻旋出，或旋进，从目镜中观看，直到分划板刻线清晰为止。

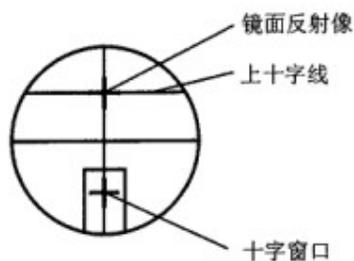


图 7.1.2-3 从目镜中看到的分划板

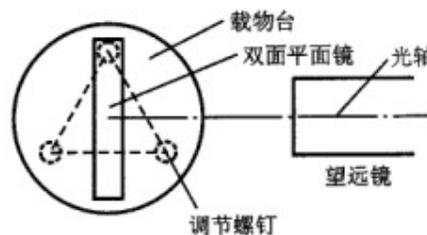


图 7.1.2-4 载物台上双面镜放置的俯视图

## 2) 调望远镜对平行光聚焦

这是要将分划板调到物镜焦平面上，调整方法是：

(a) 把目镜照明，将双面平面镜放到载物台上。为了便于调节，平面镜与载物台下三个调节螺钉的相对位置如图 7.1.2-4。

(b) 粗调望远镜光轴与镜面垂直——用眼睛估测一下，把望远镜调成水平，再调载物台螺钉，使镜面大致与望远镜垂直。

(c) 观察与调节镜面反射像——固定望远镜，双手转动游标盘，于是载物台跟着一起转动。转到平面镜正好对着望远镜时，在目镜中应看到一个绿色亮十字随着镜面转动而动，这就是镜面反射像。如果像有些模糊，只要沿轴向移动目镜筒，直到像清晰，再旋紧螺钉，则望远镜已对平行光聚焦。

## 3) 调整望远镜光轴垂直仪器主轴

当镜面与望远镜光轴垂直时，它的反射像应落在目镜分划板上与下方十字窗对称的上十字线中心，见图 7.1.2-3。平面镜绕轴转 $180^\circ$ 后，如果另一镜面的反射像也落在此处，这表明镜面平行仪器主轴。当然，此时与镜面垂直的望远镜光轴也垂直仪器主轴。

在调整过程中出现的某些现象是何原因？调整什么？应如何调整，这是要分析清楚的。例如，是调载物台？还是调望远镜？调到什么程度？下面简述之。

### (a) 载物台倾角没调整好的表现及调整

假设望远镜光轴已垂直仪器主轴，但载物台倾角没调好，见图 7.1.2-5。平面镜 A 面反射光偏上，载物台转 $180^\circ$ 后，B 面反射光偏下。在目镜中看到的现象是 A 面反射像在 B 面反射像的上方。显然，调整方法是把 B 面像（或 A 面像）向上（向下）调到两像点距离的一半，使镜面 A 和 B 的像落在分划板上同一高度。

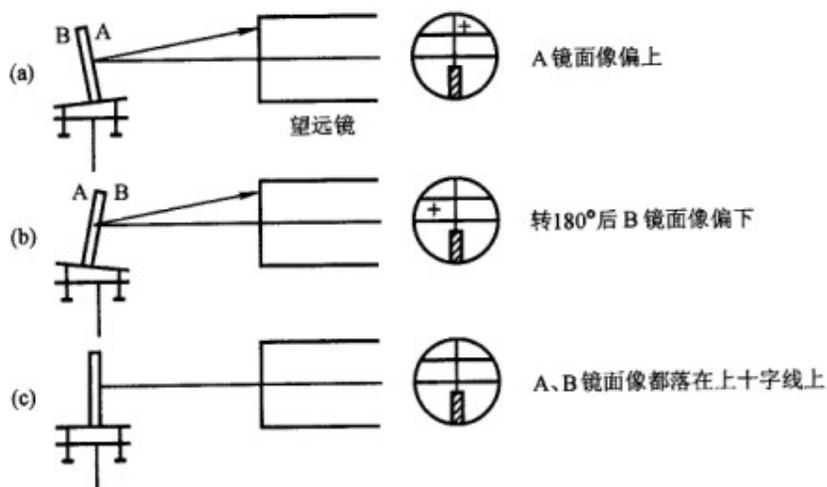


图 7.1.2-5 载物台倾角没调好的表现及调整原理

### (b) 望远镜光轴没调好的表现及调整

假设载物台已调好，但望远镜光轴不垂直仪器主轴，见图 7.1.2-6。在图 (a) 中，无论平面镜 A 面还是 B 面，反射光都偏上，反射像落在分划板上十字线的上方。在图 (b) 中，镜面反射光都偏下，反射像都落在十字线的下方。显然，调整方法是只要调整望远镜仰角调节螺钉 (12)，把像

调到上十字线上即可，见图 (c)。

(c) 载物台和望远镜光轴都没调好的表现和调整方法

表现是两镜面反射像一上一下。先调载物台螺钉，使两镜面反射像像点等高（但像点没落在上十字线上），再把像调到上十字线上，见图 7.1.2-6 (c)。

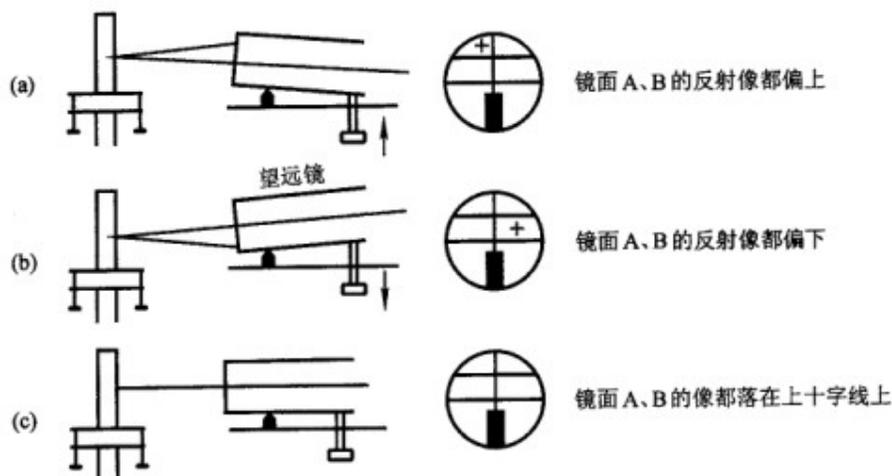


图 7.1.2-6 望远镜光轴没调好的表现及调整原理

(2) 调整平行光管发出平行光并垂直仪器主轴

将被照明的狭缝调到平行光管物镜焦平面上，物镜将出射平行光。

调整方法是：取下平面镜和目镜照明光源，狭缝对准前方汞灯光源，使望远镜转向平行光管方向，在目镜中观察狭缝像，沿轴向移动狭缝筒，直到像清晰。这表明光管已发出平行光，为什么？

再将狭缝转向横向，调螺钉 (25)，将像调到中心横线上，见图 7.1.2-7 (a)。这表明平行光管光轴已与望远镜光轴共线，所以也垂直仪器主轴。螺钉 (25) 不能再用。(为什么？)

再将狭缝调成垂直，锁紧螺钉，见图 7.1.2-7 (b)。

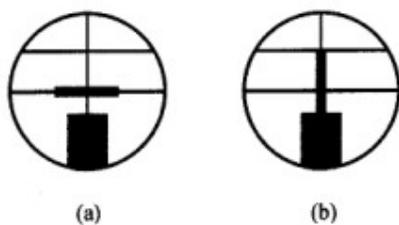


图 7.1.2-7 平行光管光轴与望远镜光轴共线

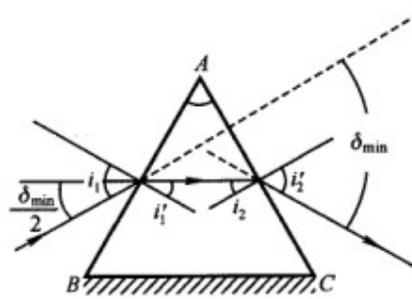


图 7.1.2-8 三棱镜最小偏向角原理图

3. 用最小偏向角法测三棱镜材料的折射率

见图 7.1.2-8，一束单色光以  $i_1$  角入射到  $AB$  面上，经棱镜两次折射后，从  $AC$  面折射出来，出射角为  $i_2'$ 。入射光和出射光之间的夹角  $\delta$  称为偏向角。当棱镜顶角  $A$  一定时，偏向角  $\delta$  的大小随入射角  $i_1$  的变化而变化。当  $i_1 = i_2'$  时， $\delta$  为最小（证明略）。这时的偏向角称为最小偏向角，记作  $\delta_{min}$ 。

由图 7.1.2-8 中可以看出, 这时

$$i_1' = \frac{A}{2}$$

$$\frac{\delta_{\min}}{2} = i_1 - i_1' = i_1 - \frac{A}{2} \quad (1)$$

$$i_1 = \frac{1}{2}(\delta_{\min} + A)$$

设棱镜材料折射率为  $n$ , 则

$$\sin i_1 = n \sin i_1' = n \sin \frac{A}{2}$$

故

$$n = \frac{\sin i_1}{\sin \frac{A}{2}} = \frac{\sin \frac{\delta_{\min} + A}{2}}{\sin \frac{A}{2}} \quad (2)$$

由此可知, 要求得棱镜材料折射率  $n$ , 须测出其顶角  $A$  和最小偏向角  $\delta_{\min}$ 。

## 实验内容

1. 调整分光计 (要求与调整方法见原理部分)

2. 使三棱镜光学侧面垂直望远镜光轴

(1) 调载物台的上下台面大致平行, 将棱镜放到平台上, 使棱镜三边与台下三螺钉的连线所成三边相互垂直, 见图 7.1.2-9。试分析这样放置的好处。

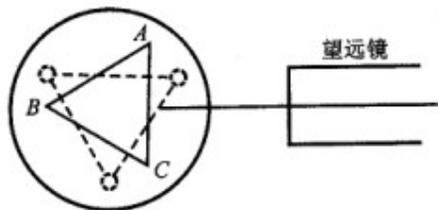


图 7.1.2-9 三棱镜在载物台上的正确放法

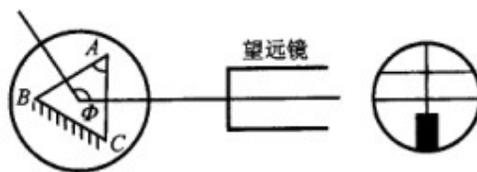


图 7.1.2-10 测棱镜顶角  $A$

(2) 接通目镜照明光源, 遮住从平行光管来的光。转动载物台, 在望远镜中观察从侧面  $AC$  和  $AB$  反射回来的十字像, 只调台下三螺钉, 使其反射像都落到上十字线处, 见图 7.1.2-10。调节时, 切勿动螺钉 (12) (为什么?)。

注意: 每个螺钉的调节要轻微, 要同时观察它对各侧面反射像的影响。调好后的棱镜, 其位置不能再动。

3. 测棱镜顶角

对两游标作适当标记, 分别称游标 1 和游标 2, 切勿颠倒。旋紧度盘下螺钉 (16)、(17), 望远镜和刻度盘固定不动。转动游标盘, 使棱镜  $AC$  面正对望远镜, 见图 7.1.2-10。记下游标 1 的读数  $\theta_1$  和游标 2 的读数  $\theta_2$ 。再转动游标盘, 再使  $AB$  面正对望远镜, 记下游标 1 的读数  $\theta_1'$  和游标 2

的读数  $\theta'_2$ 。两次读数之差即是载物台转过的角度  $\Phi = \frac{1}{2} [|\theta_1 - \theta'_1| + |\theta_2 - \theta'_2|]$ ，而  $\Phi$  是顶角  $A$  的补角，

$$A = \pi - \Phi$$

#### 4. 测三棱镜的最小偏向角

(1) 平行光管狭缝对准前方汞灯光源。

(2) 旋松望远镜止动螺钉 (16) 和游标盘止动螺钉 (23)，把载物台及望远镜转至如图 7.1.2-11 中所示的位置 (1) 处，再左右微微转动望远镜，找出棱镜出射的各种颜色的汞灯光谱线 (各种波长的狭缝像)。

(3) 轻轻转动载物台 (改变入射角  $i_1$ )，在望远镜中看到谱线跟着动。改变  $i_1$ ，应使谱线往  $\delta$  减小的方向移动 (向顶角  $A$  方向移动)。望远镜要跟踪光谱线转动，直到棱镜继续转动，而谱线开始要反向移动 (即偏向角反而变大) 为止。这个反向移动的转折位置，就是光线以最小偏向角射出的方向。固定载物台 (锁紧 23)，再使望远镜微动，使其分划板上的中心竖线对准其中的那条绿谱线 (546.1 nm)。

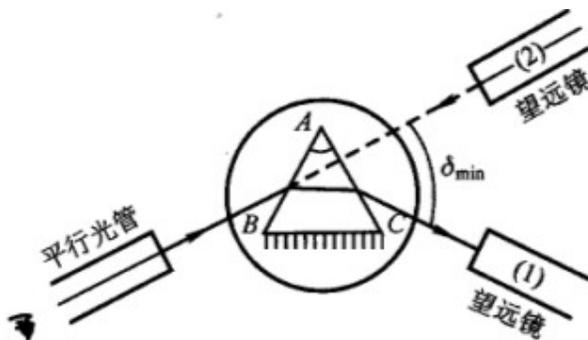


图 7.1.2-11 测最小偏向角方法

#### (4) 测量

记下此时两游标处的读数  $\theta_1$  和  $\theta_2$ 。取下三棱镜 (载物台保持不动)，转动望远镜对准平行发光管，即图 7.1.2-11 中 (2) 的位置，以确定入射光的方向，再记下两游标处的读数  $\theta'_1$  和  $\theta'_2$ 。此时绿谱线的最小偏向角

$$\delta_{\min} = \frac{1}{2} [|\theta_1 - \theta'_1| + |\theta_2 - \theta'_2|]$$

将  $\delta_{\min}$  值和测得的棱镜  $A$  角平均值代入式 (2) 计算折射率  $n$  及其不确定度。

#### 注意事项

(1) 转动载物台，都是指转动游标盘带动载物台一起转动。

(2) 狭缝宽度 1 mm 左右为宜，宽了测量误差大，窄了光通量小。狭缝易损坏，尽量少调，调节时要边看边调，动作要轻，切忌狭缝宽度过小，损坏刀口。

(3) 光学仪器螺钉的调节动作要轻柔，锁紧螺钉也是指锁住即可，不可用力过大，以免损坏器件。

### 思考题

1. 已调好望远镜光轴垂直主轴，若将平面镜取下后，又放到载物台上（放的位置与拿下前的位置不同），发现两镜面又不垂直望远镜光轴了，这是为什么？是否说明望远镜光轴还没调好？

更新日期：2021.3.1

# 干涉法测微小量

## 实验要求：

### 1. 预习阶段

- (1) 认真阅读实验讲义。
- (2) 课程开始时填写预习卷子<https://ks.wjx.top/vj/eN6f2ZW.aspx>

### 2. 实验阶段

- (1) 维护良好的课堂秩序，在实验室内尽量保持安静。
- (2) 维护整洁的实验环境，不要将水杯等放在试验台上，不得在实验室内吃口香糖。
- (3) 爱护实验设备，轻拿轻放。在老师讲解后才能动手操作。并且在动手前应仔细阅读实验注意事项和操作说明。
- (4) 如实记录实验数据，不得篡改、抄袭。
- (5) 实验数据经指导老师签字、实验设备整理好后方可离开。

### 3. 本实验不写实验报告，但要求当堂处理实验数据

## 注意事项：

### 1. 爱护光学元件

光学实验中使用的绝大部分光学元件是玻璃制成的，光学表面经过精心抛光。使用时要轻拿、轻放，避免碰撞、损坏元件。任何时候都不要用手触及光学表面（镀膜片或光在此表面反射或折射），只能拿磨砂面（光线不经过的面一般都磨成毛面，如透镜的侧面，棱镜的上下底面等），不要对着光学元件表面说话、咳嗽、打喷嚏等。

**2. 钠灯需提前预热 10 分钟，实验过程中不要关闭，不要震动。若关闭，需等完全冷却下来才能再次开启。**

光的干涉现象表明了光的波动性质，干涉现象在科学研究与计量技术中有着广泛的应用。在干涉现象中，不论是何种干涉，相邻干涉条纹的光程差的改变都等于相干光的波长，可见光的波长虽然很小，但干涉条纹间的距离或干涉条纹的数目却是可以计量的。因此，通过对干涉条纹数目或条纹移动数目的计量，可得到以光的波长为单位的光程差。

利用光的等厚干涉现象可以测量光的波长，检验表面的平面度、球面度、光洁度，精确地测量长度、角度，测量微小形变以及研究工件内应力的分布等。

通过本次实验，学习、掌握利用光的干涉原理检验光学元件表面几何特征的方法，用劈尖的等厚干涉测量细丝直径的方法，同时加深对光的波动性的认识。

## 实验原理

### 1. 用牛顿环测平凸透镜的曲率半径

当曲率半径很大的平凸透镜的凸面放在一平面玻璃上时，见图 7.2.1-1，在透镜的凸面与平面之间形成一个从中心 O 向四周逐渐增厚的空气层。当单色光垂直照射下来时，从空气层上下两个表面反射的光束 1 和光束 2 在上表面相遇时产生干涉。因为光程差相等的地方是以 O 点为中心的同心圆，因此等厚干涉条纹也是一组以 O 点为中心的明暗相间的同心圆，称为牛顿环。由于从下表面反射的光多走了二倍空气层厚度的距离，以及从下表面反射时，是从光疏介质到光密介质而存在半波损失，故 1、2 两束光的光程差为

$$\Delta = 2\delta + \frac{\lambda}{2} \quad (1)$$

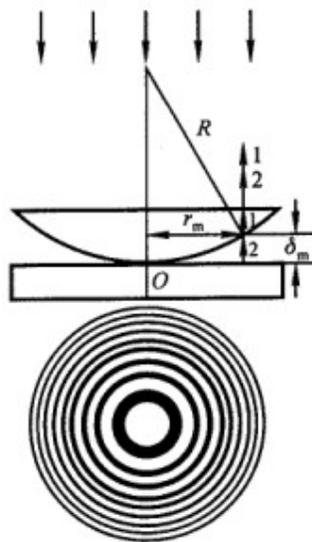


图 7.2.1-1 牛顿环干涉条纹的形成

式中  $\lambda$  为入射光的波长， $\delta$  是空气层厚度，空气折射率  $n \approx 1$ 。

当程差  $\Delta$  为半波长的奇数倍时为暗环，若第  $m$  个暗环处的空气层厚度为  $\delta_m$ ，则有

$$\Delta = 2\delta_m + \frac{\lambda}{2} = (2m+1)\frac{\lambda}{2}, m = 0,1,2,3\dots$$

$$\delta_m = m \cdot \frac{\lambda}{2} \quad (2)$$

由图 7.2.1-1 中的几何关系  $R^2 = r_m^2 + (R - \delta_m)^2$ ，以及一般空气层厚度远小于所使用的平凸透镜的曲率半径  $R$ ，即  $\delta_m \ll R$ ，可得

$$\delta_m = \frac{r_m^2}{2R} \quad (3)$$

式中  $r_m$  是第  $m$  个暗环的半径。由式 (2) 和式 (3) 可得

$$r_m^2 = mR\lambda \quad (4)$$

可见，我们若测得第  $m$  个暗环的半径  $r_m$  便可由已知  $\lambda$  求  $R$ ，或者由已知  $R$  求  $\lambda$  了。但是，由于玻璃接触处受压，引起局部的弹性形变，使透镜凸面与平面玻璃不可能很理想的只以一个点相接触，所以圆心位置很难确定，环的半径  $r_m$  也就不易测准。同时因玻璃表面的不洁净所引入的附加程差，使实验中看到的干涉级数并不代表真正的干涉级数  $m$ 。为此，我们将式 (4) 作一变换，将式中半径  $r_m$  换成直径  $D_m$ ，则有

$$D_m^2 = 4mR\lambda \quad (5)$$

对第  $m+n$  个暗环有

$$D_{m+n}^2 = 4(m+n)R\lambda \quad (6)$$

将 (5) 和 (6) 两式相减，再展开整理后有

$$R = \frac{D_{m+n}^2 - D_m^2}{4n\lambda} \quad (7)$$

可见，如果我们测得第  $m$  个暗环及第  $(m+n)$  个暗环的直径  $D_m$ 、 $D_{m+n}$ ，就可由式 (7) 计算透镜的曲率半径  $R$ 。

经过上述的公式变换，避开了难测的量  $r_m$  和  $m$ ，从而提高了测量的精度，这是物理实验中常采用的方法。

## 2. 劈尖的等厚干涉测细丝直径

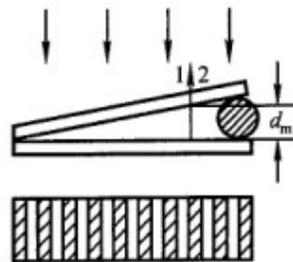


图 7.2.1-2 劈尖干涉条纹的形成

见图 7.2.1-2，两片叠在一起的玻璃片，在它们的一端夹一直径待测的细丝，于是两玻璃片之

间形成一空气劈尖。当用单色光垂直照射时，如前所述，会产生干涉现象。因为程差相等的地方是平行于两玻璃片交线的直线，所以等厚干涉条纹是一组明暗相间、平行于交线的直线。

设入射光波为 $\lambda$ ，则由式(2)得第 $m$ 级暗纹处空气劈尖的厚度

$$d = m \frac{\lambda}{2} \quad (8)$$

由式(8)可知， $m=0$ 时， $d=0$ ，即在两玻璃片交线处，为零级暗条纹。如果在细丝处呈现 $m=N$ 级条纹，则待测细丝直径 $d = N \cdot \frac{\lambda}{2}$ 。

具体测量时，常用劈尖盒，盒内装有两片叠在一起玻璃片，在它们的一端夹一细丝，于是两玻璃片之间形成一空气劈尖，见图 7.2.1-2。使用时木盒切勿倒置或将玻璃片倒出，以免细丝位置变动，给测量带来误差。

### 3. 利用干涉条纹检验光学表面面形

检查光学平面的方法通常是将光学样板(平面平晶)放在被测平面之上，在样板的标准平面与待测平面之间形成一个空气薄膜。当单色光垂直照射时，通过观测空气膜上的等厚干涉条纹即可判断被测光学表面的面形。

#### (1) 待测表面是平面

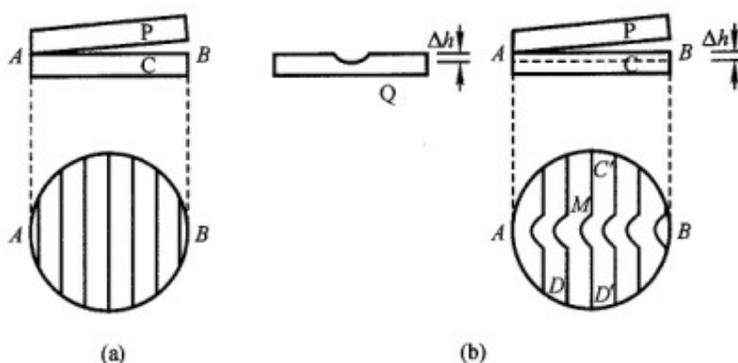


图 7.2.1-3 平面面形的干涉条纹

两表面一端夹一极薄垫片，形成一楔形空气膜，如果干涉条纹是等距离的平行直条纹，则被测平面是精确的平面，见图 7.2.1-3 (a)，如果干涉条纹如图 7.2.1-3 (b) 所示，则表明待测表面中心沿 AB 方向有一柱面形凹痕。因为凹痕处的空气膜的厚度较其两侧平面部分厚，所以干涉条纹在凹痕处弯向膜层较薄的 A 端。

#### (2) 待测表面呈微凸球面或微凹球面

将平面平晶放在待测表面上，可看到同心圆环状的干涉条纹，参看图 7.2.1-4。用手指在平晶上表面中心部位轻轻一按，如果干涉圆环向中心收缩，表明面形是凹面；如果干涉圆环从中心向边缘扩散，则面形是凸面。这种现象可解释为：当手指向下按时，空气膜变薄，各级干涉条纹要发生移动，以满足式(2)。

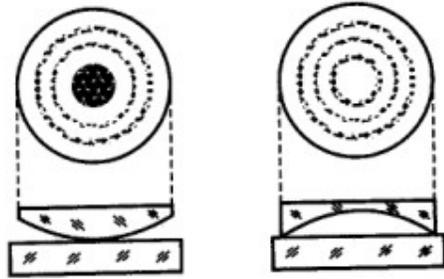


图 7.2.1-4 球面面形的干涉条纹

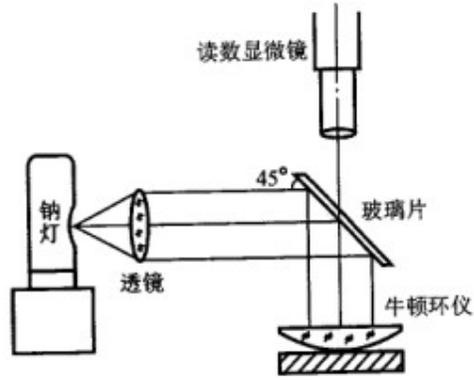


图 7.2.1-5 观测牛顿环实验装置图

## 实验内容

### 1. 测平凸透镜的曲率半径

#### (1) 观察牛顿环

- 1) 将牛顿环仪按图 7.2.1-5 所示放置在读数显微镜镜筒和入射光调节木架的玻璃片的下方，木架上的透镜要正对着钠光灯窗口，调节玻璃片角度，使通过显微镜目镜观察时视场最亮。
- 2) 调节目镜，看清目镜视场的十字叉丝后，使显微镜筒下降到接近玻璃片，然后缓慢上升，直到观察到干涉条纹，再微调玻璃片角度及显微镜，使条纹更清楚。

#### (2) 测牛顿环直径

- 1) 使显微镜的十字叉丝交点与牛顿环中心重合，并使水平方向的叉丝与标尺平行（与显微镜筒移动方向平行）。
- 2) 转动显微镜测微鼓轮，使显微镜筒沿一个方向移动，同时数出十字叉丝竖丝移过的暗环数，直到竖丝与第 35 环相切为止。
- 3) 反向转动鼓轮，当竖丝与第 30 环相切时，记录读数显微镜上的位置读数  $d_{30}$ ，然后继续转动鼓轮，使竖丝依次与第 25、20、15、10、5 环相切，顺次记下读数  $d_{25}$ 、 $d_{20}$ 、 $d_{15}$ 、 $d_{10}$ 、 $d_5$ 。
- 4) 继续转动鼓轮，越过干涉圆环中心，记下竖丝依次与另一边的 5、10、15、20、25、30 环相切时的读数  $d'_5$ 、 $d'_{10}$ 、 $d'_{15}$ 、 $d'_{20}$ 、 $d'_{25}$ 、 $d'_{30}$ 。

两次将牛顿环装置转过 120 度，重复上述测量，共测得三组数据。

#### (3) 处理数据

第 30 环的直径  $D_{30} = |d_{30} - d'_{30}|$ ，求出其平均值。同理，可求出  $D_{25}$ 、 $D_{20}$ ... $D_5$ 。再利用式 (7)

和逐差的办法计算出平凸透镜的曲率半径  $R$ 。推导不确定度传递公式，求出  $R$  的不确定度。

### 2. 测细丝直径

#### (1) 观察干涉条纹

将劈尖盒放在曾放置牛顿环的位置，同前法调节，观察到干涉条纹，使条纹最清晰。

#### (2) 测量

- 1) 调整显微镜及劈尖盒的位置，当转动测微鼓轮使镜筒移动时，十字叉丝的竖丝要保持与条纹平行。
- 2) 在劈尖玻璃面的三个不同部分，测出 20 条暗纹的总长度  $\Delta l$ ，测三次求其平均值及单位长度的干涉条纹数  $n = \frac{20}{\Delta l}$ 。
- 3) 测劈尖两玻璃片交线处到夹细线处的总长度  $L$ ，测三次，求平均值。
- 4) 由式 (8)，求细丝直径

$$d = N \cdot \frac{\lambda}{2} = L \cdot n \cdot \frac{\lambda}{2} = L \cdot \frac{20}{\Delta l} \cdot \frac{\lambda}{2} \quad (9)$$

### 3. 检查玻璃表面面形并作定性分析

在标准表面和受检表面正式接触前，必须先用酒精清洗，再用抗静电的小刷子把清洗之后残余的灰尘小粒刷去。待测玻璃放在黑绒上，受检表面要朝上，再轻轻放上平面平晶。在单色光或水银灯垂直照射下观察干涉条纹的形状，判断被检表面的面形。如果看不到干涉条纹，主要原因是两接触表面不清洁，还附有灰尘微粒所至，应再进行清洁处理。

平面平晶属高精度光学元件，注意使用规则。

### 思考题

1. 参看图 7.2.1-6，从空气膜上下表面反射的光线相遇在 D 处发生相干，其光程差为  $\Delta = AB + BC + CD - AD + \frac{\lambda}{2}$ ，为什么式 (1) 写  $\Delta = 2\delta + \frac{\lambda}{2}$ ？

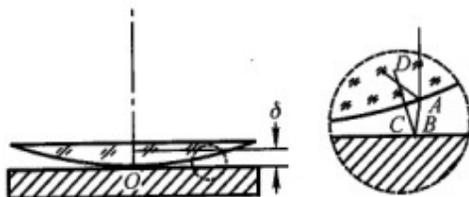


图 7.2.1-6 相干光的程差

2. 牛顿环的中心级次是多少？是亮斑还是暗斑？你实验用的牛顿环中心是亮还是暗？
3. 为什么说在牛顿环和劈尖实验中测量的干涉条纹数越多，测量的精度越高？

更新时间 2020 9/1

## 【实验说明】

1、组内编号前二分之一的同学，第一次课做“半导体温度计的设计和制作”，其他同学，第一次课做“数字示波器的使用”。第二周交换。

### 2、实验预习

(1) 必须在来上课前完成预习思考题(扫描下面的二维码)，否则没有预习成绩。



二维码：

链接：<https://ks.wjx.top/vj/wjtU3zA.aspx>

(2) 必须在来上课前完成附件 2 的预习报告，否则不允许做实验。每台仪器参数不同，每位同学需根据所在组内序号，找到自己所用仪器对应的参数表，完成实验预习。

### 3. 实验操作

- (1) 讲课结束前禁止打开、调节实验仪器；
- (2) 实验开始前了解注意事项，爱护实验设备，轻拿轻放，注意人身安全及实验仪器安全；
- (3) 维护课堂秩序，实验室内禁止喧哗、吃食物、穿拖鞋；
- (4) 如实记录实验数据，编造、篡改实验数据一经发现判零分。
- (5) 实验数据经指导老师签字，完成出门测思考题（题目在实验室扫二维码完成），并整理好实验设备后方可离开。

### 4. 实验数据

本实验要求当堂独立完成实验并提交数据签字，课后撰写一份完整的实验报告。

### 5、实验成绩共 55 分。

预习思考题 5 分，预习报告+实验操作+出门测 30 分，实验报告 20 分（含思考题 4 题）。

## 半导体温度计的设计和制作

半导体温度计以半导体热敏电阻作为温度传感器，利用半导体的阻值随温度变化而急剧变化的特性，将温度转化为相应的阻值，通过对其阻值的测量实现温度的测量。在测量过程中，各种非电量（如长度、位移、应力、应变、温度、光强等）常被转变成电学量（如电阻、电压、电流、电感和电容等）后，用电学仪器来进行测量，这就是非电量电测法。阻值随温度的增加而减小的热敏电阻称为负温度系数（NTC, Negative Temperature Coefficient）热敏电阻，目前在温度测量领域应用较广，是常用的温度传感器，具有用料省、成本低、体积小、结构简易、电阻温度系数绝对值大等特点。本实验要求利用非定量电测法，以负温度系数热敏电阻为温度传感器，设计制作半导体温度计，进行温度的测量。

### 待研究问题

设计制作一个半导体温度计，温度测量范围：20~70 °C。要求选用半导体热敏电阻作为温度传感器，设计制作相应的测温电路，实现测量要求。

### 实验原理

温度测量常用的负温度系数（NTC）热敏电阻器是以锰、钴、镍、铜等对温度非常敏感、负温度系数很大的金属氧化物为主要材料，采用陶瓷工艺制造而成的元件。这些金属氧化物材料在导电方式上完全类似锗、硅等半导体材料，都具有半导体性质。温度低时，这些氧化物材料中大部分电子是受束缚的，载流子（电子和空穴）数目少，所以电阻值较高；随着温度升高，原子的热运动加剧，部分电子由此获得较高的能量，脱离束缚态而变成自由电子，同时相应地产生空穴，被释放的自由电子与空穴参与导电，载流子数目增加，所以半导体的导电能力增强。虽然原子热运动的加剧会阻碍电子的运动，但在温度不高的情况下（一般在300°C以下），这种作用对导电性能的影响，远小于电子被释放而改善导电性能的作用，所以温度上升会使半导体的电阻值迅速下降。

通常这类金属氧化物半导体（如  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ 、 $\text{MgCr}_2\text{O}_4$  等）的电阻与温度满足如下关系：

$$R_T = R_\infty e^{\frac{B}{T}} \quad (16-1)$$

式中  $R_T$  是温度  $T$  时的热敏电阻阻值， $R_\infty$  是  $T$  趋于无穷时热敏电阻的阻值， $B$  是

热敏电阻的材料常数， $T$  为热力学温度。

定义电阻的温度系数  $\alpha$  为：
$$\alpha = \frac{1}{R_t} \cdot \frac{dR_t}{dt}$$

热敏电阻的温度系数为：
$$a = -\frac{B}{T^2}$$

如图 16-1 所示，热敏电阻的电阻-温度特性是非线性的，阻值随温度的增加呈指数下降，因此其温度系数是负的，约为  $-(30\sim 60)\times 10^{-4}K^{-1}$ 。铜金属的温度系数为  $4\times 10^{-4}K^{-1}$ ，热敏电阻的温度系数几乎大其几十倍。所以，半导体电阻对温度变化的反应比金属电阻灵敏得多。

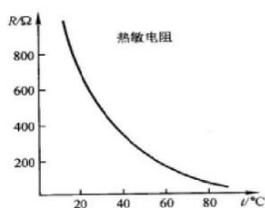


图 16-1 热敏电阻电阻温度曲线

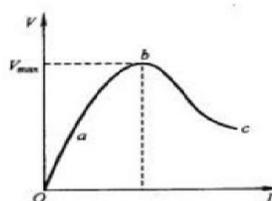


图 16-2 热敏电阻伏安特性曲线

图 16-2 为热敏电阻的伏安特性。热敏电阻伏安曲线的起始部分接近线性，而电流较大时，热敏电阻伏安特性呈现出明显的非线性。流过热敏电阻的电流较小，热敏电阻上消耗的功率不足以显著地改变热敏电阻的温度，因而符合欧姆定律。此时，电流的影响可以忽略不计，热敏电阻的阻值主要与外界温度有关。用热敏电阻设计制作半导体温度计，必须考虑热敏电阻的伏安特性。在温度计设计制作过程中要使热敏电阻工作在其小电流的线性区。

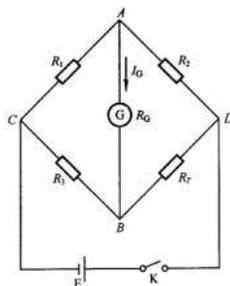


图 16-3 热敏电阻测温电路原理图

NTC 热敏电阻常温下的阻值范围为  $10^2\sim 10^6\Omega$ 。选择电桥电路对其阻值进行测量。桥式半导体温度计测温电路的原理如图 16-3 所示。图中  $R_t$  为热敏电阻， $G$  为微安计。温度计制作完成后，应将微安计电流刻度重新标定为相应温度计刻度。

假设测量的温度范围为 $[T_1, T_2]$ ，如果预先测定热敏电阻的温度阻值特性，且微安计内阻已知，那么，首先要根据设计要求确定电路参数  $E$  和  $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_3$ 。

在温度下限  $T_1$  时，要求微安计  $I_g=0$ ，此时热敏电阻值为  $R_{T1}$ ，电桥处于平衡状态，满足平衡条件  $\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_T}$ 。若如果设定电桥为对称电桥，取  $R_1=R_2$ ，则  $R_3=R_{T1}$ 。

由此确定了  $R_3$  的电阻值即为热敏电阻处在测温量程的下限温度时的电阻值  $R_{T1}$ 。

当温度增加时，热敏电阻的电阻值就会减小，电桥失去平衡， $I_g \neq 0$ ，在微安计中就有电流流过。通过电路分析可以根据微安计的读数  $I_g$  的大小计算出  $R_1$ 。微安计中的电流的大小和温度变化存在一一对应的关系，因此就可以利用这种“非平衡电桥”特性实现一定范围内温度变化的动态测量。

在温度上限  $T_2$  时，要求微安计的读数为满刻度  $I_G$ 。此时，热敏电阻值为  $R_{T2}$ ，流入微安计中的电流  $I_G$  与加在电桥两端的电压  $V_{CD}$  和  $R_1$ 、 $R_2$  有关。若流入热敏电阻  $R_3$  中的电流  $I_T$  比流入微安计内的电流  $I_G$  大得多（即  $I_T \gg I_G$ ），则加在电桥两端的电压  $V_{CD}$  近似有：

$$V_{CD} = I_T (R_3 + R) \quad (16-2)$$

根据热敏电阻伏安特性线性区可以选定热敏电阻工作的最大电流  $I_T$ 。相应地，当  $R_3=R_{T2}$  时，由式（16-2）可以确定桥端电压  $V_{CD}$  值。由基尔霍夫方程组求出流入微安计的电流  $I_G$  与  $V_{CD}$ 、 $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_3$ 、 $R_{T2}$  的关系：

$$I_G = \frac{\frac{R_2}{R_1 + R_2} - \frac{R_{T2}}{R_3 + R_{T2}}}{R_G + \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} + \frac{R_3 R_{T2}}{R_3 + R_{T2}}} V_{CD} \quad (16-3)$$

由于  $R_1=R_2$ 、 $R_3=R_{T1}$ ，整理后有：

$$R_1 = \frac{2V_{CD}}{I_G} \left( \frac{1}{2} - \frac{R_{T2}}{R_{T1} + R_{T2}} \right) - 2 \left( R_G + \frac{R_{T1} R_{T2}}{R_{T1} + R_{T2}} \right) \quad (16-4)$$

如果确定了  $V_{CD}$ ，由式（16-4）就可以确定  $R_1$  和  $R_2$  的值。而由式（16-2）， $V_{CD}$  取决于所选择的  $I_T$ ， $I_T$  小一些，则  $V_{CD}$  也小一些，相应的  $R_1$  和  $R_2$  的实际值会值小一些。根据实验中采用的热敏电阻的实际情况，选取  $V_{CD}=1V$ ，即可以保证热敏电阻工作于其伏安特性曲线的线性部分，并根据式（16-4）计算  $R_1$  和  $R_2$ 。

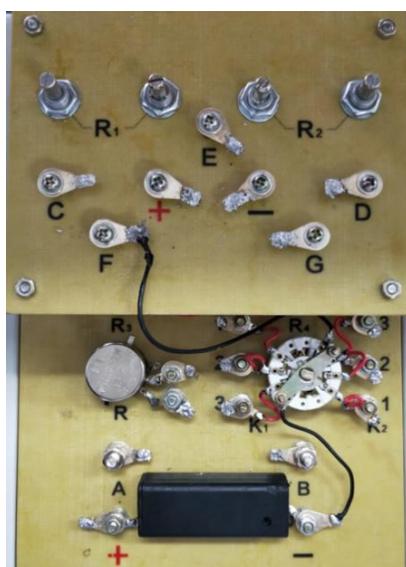
一般加在电桥两端的电压  $V_{CD}$  比所选定的电池的电动势要低些，为了保证电桥两端所需的电压，通常在电源电路中串联一个可变电阻器  $R$ ，它的电阻值应根

据电桥电路中的总电流来进行选择。

## 实验装置

实验仪器：烙铁、万用表、恒温水浴箱 2 个。

电路元件：热敏电阻（温度特性给定）、微安计（内阻  $R_g$  已知）、可变电阻箱、电位器 5 个、1.5V 电池、多档开关、待焊接的电路板、导线若干。



## 实验要求

半导体温度计的温度测量范围是  $20\sim 70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。要求微安计的全部量程均能有效地利用，即：当温度为  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  时，微安计指示为零；而温度为  $70\text{ }^{\circ}\text{C}$  时，微安计指示为满刻度。图 16-4 为半导体温度计的参考设计电路，图 16-5 为其相应的底板配置图。

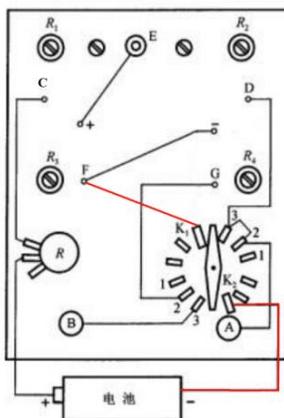
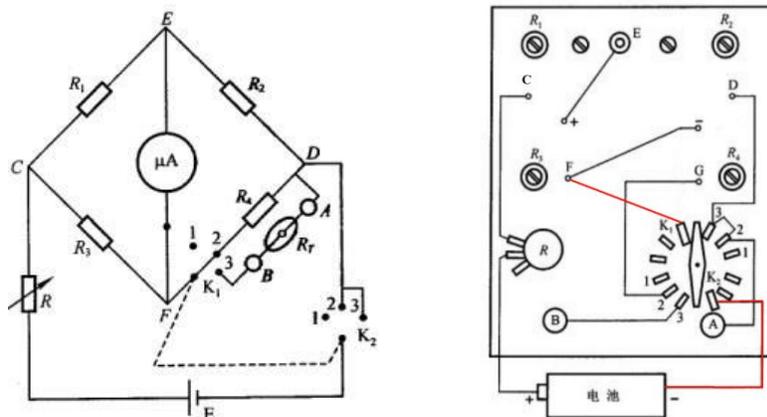


图 16-4 半导体温度计参考电路 图 16-5 半导体温度计底板配置图

### 1. 设计计算电路参数

(1) 绘制热敏电阻的电阻-温度曲线，并确定所设计的半导体温度计的下限温度 ( $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) 所对应的电阻值  $R_{T1}$  和上限温度 ( $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) 所对应的电阻值  $R_{T2}$ 。

(2) 由热敏电阻的伏安特性曲线确定最大工作电流  $I_T$ 。根据实验中采用的热敏电阻的实际情况，选取  $V_{CD}=1\text{V}$ ，电路电源选用一节  $1.5\text{V}$  干电池。

(3) 根据所给微安计的内阻  $R_G$ ，令  $R_1=R_2$ 、 $R_3=R_{T1}$ ，由式 (16-4) 计算桥臂电阻  $R_1$  和  $R_2$ 。

### 2. 电路连接和电路元件设定

(1) 在焊接电路前用万用表测量并调节  $R_1=R_2$ ，并使之阻值达到式 (16-4) 的计算值 (可以取比计算值略小的整数)。注意，在随后的制作过程中应保持  $R_1$  和  $R_2$  阻值不变。如不小心改变了阻值，应将开关置于 1 档，拔下 E 处接线，断开微安计，用万用表重新测量并调节  $R_1$  和  $R_2$ 。

(2) 用电烙铁焊接电路。要注意对照线路原理图 (图 16-4) 和底板配置图 (图 16-5)，确定实验所用元件、位置及线路的连接方向。注意正确使用电烙铁，学会焊接，防止重焊、虚焊、漏焊、断路和短路。焊接时  $K_1$  放在 1 档，微安计

“+”端与E处要最后连接，以免损坏电表。

(3) 设定  $R_3$ 、 $R_4$  和  $R$ 。用电阻箱代替热敏电阻接入接线柱 A 和 B。

1) 开关置于 3 档，令电阻箱的阻值为测量下限温度 ( $20^{\circ}\text{C}$ ) 所对应的  $R_{T1}$ ，调节电位器  $R_3$ ，使电表指示为零 (注意，在以后调节过程中， $R_3$  保持不变)。然后，使电阻箱的阻值为上限温度 ( $70^{\circ}\text{C}$ ) 所对应的  $R_{T2}$ ，调节电位器  $R$ ，使微安计满量程。

2) 开关置于 2 挡，调节电位器  $R_4$ ，使微安计满量程，这时， $R_4=R_{T2}$ 。

3. 标定温度计表盘刻度。开关置于 3 挡，每隔  $5^{\circ}\text{C}$  从热敏电阻的电阻-温度特性曲线上读出温度  $20^{\circ}\text{C}\sim 70^{\circ}\text{C}$  间一系列电阻值。电阻箱逐次选择前面所取的电阻值，读出微安计的电流读数  $I$ 。将图 16-6 的微安计表盘刻度改成温度的刻度。作出相应的 I-T 曲线。

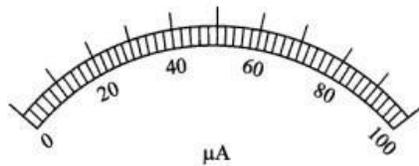


图 16-6 微安计表盘刻度

#### 4. 温度计测试

开关置于 1 档，用实际热敏电阻代替电阻箱，完成经过定标的半导体温度计，要注意必须用设计时使用的那个热敏电阻。

开关置于 3 档，用此温度计测量恒温水浴箱提供的两个恒定温度 ( $32^{\circ}\text{C}$ 、 $58^{\circ}\text{C}$ )，使用局部线性估算出温度值并填写在标定好的微安计表盘上。

与恒温箱自身提供的水银温度计的温度进行比较，计算测量的相对误差。(也可试测自己的体温或室温)。

#### 注意事项

- (1) 使用电烙铁时一定要注意安全，以免烫伤。
- (2) 注意正确使用电烙铁，学会焊接，防止重焊、虚焊、漏焊、断路。焊接时  $K_1$  放在 1 挡，电流计“+”端与 E 处要最后连接，以免损坏电表。
- (3) 实验完毕后，请用电烙铁拆除所有自己焊接的导线，仪器归位。
- (4) 实验中书包，水杯等所有随身物品一律不准放在试验台上，

## 思考题

1. 用万用表测量并调节  $R_1$  和  $R_2$  的阻值时，可以取比式 (16-4) 计算值略小的整数。为什么？
2. 完成电路连接后，如果需要测  $R_1$  和  $R_2$ ，为什么需将开关置于 1 挡，拔下 E 处接线，断开微安计？
3. 开关置于 3 挡，电阻箱接入接线柱 A 和 B。使电阻箱的阻值为上限温度 ( $70^{\circ}\text{C}$ ) 所对应的  $R_{T_2}$ 。为什么此时调节电位器  $R$  可以使微安计满刻度？
4. 开关置于 2 挡，调节电位器  $R_4$  使微安计满量程，这时， $R_4=R_{T_2}$ 。这样做的目的何在？

附表 1: 微安计内阻  $R_G$ 、最大电流刻度、热敏电阻的温度-阻值表。

台号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$R_G(\Omega)$	3407	3419	3439	3393	3407	3366	3379	3388	3367	3367
$I_G(\mu A)$	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
$T(^{\circ}C)$	$R_t(\Omega)$									
18.5	2443	2414	2431	2493	2422	2430	2425	2433	2452	2429
20.0	2302	2275	2281	2355	2290	2300	2284	2294	2332	2285
22.7	2105	2085	2093	2106	2104	2105	2103	2103	2132	2076
25.0	1942	1924	1932	1999	1936	1942	1938	1941	1971	1933
27.5	1782	1772	1769	1839	1781	1789	1779	1781	1807	1774
30.0	1651	1629	1628	1693	1648	1652	1635	1649	1675	1632
32.6	1500	1486	1486	1544	1495	1500	1493	1497	1521	1489
35.0	1382	1369	1358	1426	1381	1384	1297	1384	1403	1374
37.5	1264	1252	1253	1300	1261	1266	1259	1268	1284	1259
40.0	1161	1154	1159	1201	1164	1164	1164	1158	1183	1163
42.7	1071	1053	1057	1099	1066	1070	1061	1069	1083	1061
45.0	988	977	979	1016	988	990	984	991	1006	980
47.7	910	897	896	929	906	910	900	910	920	900
50.0	842	831	831	863	838	840	833	840	854	835
52.5	768	765	762	793	776	768	767	766	781	765
55.0	710	702	702	727	707	709	704	710	718	708
57.7	653	645	644	668	651	654	647	648	661	646
60.2	601	595	592	619	598	600	598	598	608	596
62.7	557	550	548	570	555	557	551	556	564	545
65.0	519	510	510	529	515	517	512	517	522	514
67.7	471	467	469	488	468	471	470	472	476	470
70.0	442	438	436	455	438	442	437	440	450	437
72.7	407	400	400	423	405	404	399	404	410	400
75.0	381	376	376	389	379	380	375	379	386	376

附表 2：预习参考格式

半导体温度计的设计和制作预习报告

姓名：            学号：            台号：

R-T 曲线

R1=R2=\_\_\_\_\_

画 R-T 曲线时，注意图名，单位等细节。

## 【实验说明】

1、组内编号前二分之一的同学，第一次课做“半导体温度计的设计和制作”，其他同学，第一次课做“数字示波器的使用”。第二周交换。

### 2、实验预习

必须在来上课前完成预习思考题（扫描下面的二维码），否则没有预习成绩。



二维码：

链接：<https://ks.wjx.top/vj/tdTAJBA.aspx>

### 3. 实验操作

- (1) 讲课结束前禁止打开、调节实验仪器；
- (2) 实验开始前了解注意事项，爱护实验设备，轻拿轻放，注意人身安全及实验仪器安全；
- (3) 维护课堂秩序，实验室内禁止喧哗、吃食物、穿拖鞋；
- (4) 如实记录实验数据，编造、篡改实验数据一经发现判零分。
- (5) 实验数据经指导老师签字，完成出门测思考题（题目在实验室扫二维码完成），并整理好实验设备后方可离开。

### 4. 实验数据

本实验要求当堂独立完成实验并提交数据签字，当堂完成实验内容中要求的思考和分析，作为当堂报告。课后无需撰写实验报告。

### 5、实验成绩共 45 分。

预习思考题 5 分，实验操作+当堂报告+出门测 40 分。

# 数字存储示波器的原理及使用

1429 实验室, 2021 年 4 月

示波器是一种用途十分广泛的电子测量仪器。它能把肉眼看不见的电信号变换成看得见的图象, 便于人们研究各种电现象的变化过程。目前大量使用的示波器有两种: 模拟示波器和数字示波器。模拟示波器发展较早, 技术也非常成熟, 其优点主要是带宽宽、成本低。但是随着数字技术的飞速发展, 数字示波器拥有了许多模拟示波器不具备的优点: 不仅具有可存储波形、体积小、功耗低、使用方便等优点, 而且还具有强大的信号实时处理分析功能和输入输出功能, 可以与计算机或其他外设相连实现更复杂的数据运算或分析。随着相关技术的进一步发展, 数字示波器的频率范围也越来越高, 其使用范围将更为广泛因此, 学习数字示波器的使用具有重要的意义。

## 实验目的

1. 了解数字示波器的工作原理;
2. 掌握数字示波器的使用方法;
3. 会用数字示波器测量未知信号参数。

## 实验原理

数字存储示波器与模拟示波器不同在于, 信号进入示波器后立刻通过高速 A/D 转换器将模拟信号前端快速采样, 存储其数字化信号, 并利用数字信号处理技术对所存储的数据进行实时快速处理, 得到信号的波形及其参数, 然后由示波器显示, 从而实现显示波形的功能。而且测量精度高, 还可以存储和调用显示特定时刻信号。

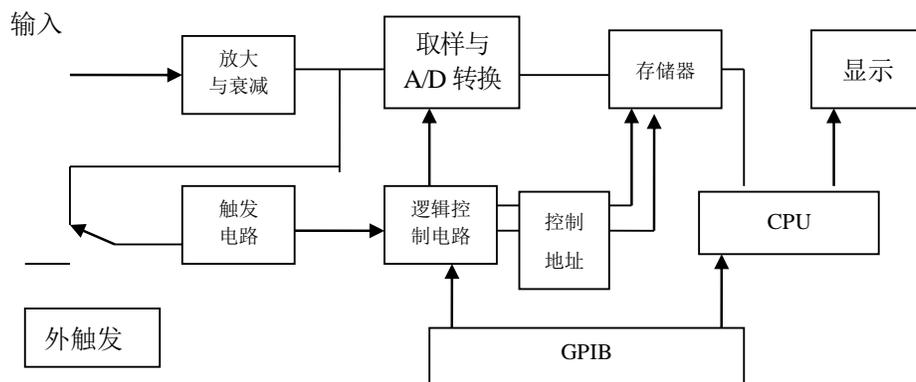


图 1 典型数字存储示波器原理框图

一个典型的数字存储示波器原理框图如图 1 所示, 模拟输入信号先适当地放大或衰减, 然后再

进行数字化处理。数字化包括“取样”和“量化”两个过程，取样是获得模拟输入信号的离散值，而量化则是使每个取样的离散值经 A/D 转换成二进制数字，最后，数字化的信号在逻辑控制电路的控制下依次写入到 RAM（存储器）中，CPU 从存储器中依次把数字信号读出并在显示屏上显示相应的信号波形。GPIB 为通用接口总线系统，通过它可以程控数字存储示波器的工作状态，并且使内部存储器和外部存储器交换数据成为可能。

由此可见，数字示波器必须要完成波形的取样、存储和波形的显示，另外为了满足一般应用的需求，几乎所有微机化的数字示波器都提供了波形的测量与处理功能。

## 1. 波形的取样和存储

由于数字系统只能处理离散信号，所以必须对模拟连续波形先进行抽样，再进行 A/D 转换。根据 Nyquist 定理，只有抽样频率大于要处理信号频率的两倍时，才能在显示端理想地复现该信号。

连续信号离散化通过如图 2 所示的取样方法完成，把模拟波形送到加有反偏的取样门的  $a$  点，在  $c$  点加入等间隔的取样脉冲，则对应时间  $t_n(n=1,2,3, \dots)$ ，取样脉冲打开取样门的一瞬间，在  $b$  点就得到相应的模拟量  $a_n(n=1,2,3, \dots)$ ，这个模拟量就是离散化了的模拟量，把每一个模拟量进行 A/D 转换，就可以得到相应的数字量，如  $a_1 \rightarrow A/D \rightarrow 01H$ ； $a_2 \rightarrow A/D \rightarrow 02H$ ； $a_3 \rightarrow A/D \rightarrow 03H \dots$ 。如果把这些数字量按序存放在存储器中就相当于把一幅模拟波形以数字量存储起来。

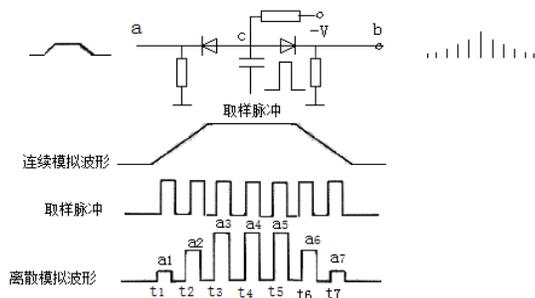


图 2 连续模拟波形的离散化

## 2. 波形的显示

数字存储示波器必须把上面存储器中的波形显示出来以使用户进行观察、处理和测量。存储器中每个单元存储了一个抽样点的信息，在显示屏上显示为一个点，该点 Y 方向的坐标值决定于数字信号值的大小、示波器 Y 方向电压灵敏度设定值、Y 方向整体偏移量，X 方向的坐标值决定于数字信号值在存储器中的位置（即地址）、示波器 X 方向电压灵敏度的设定值、X 方向的整体偏移量。

为了适应对不同波形的观测、智能化的数字存储器有多种灵活的显示方式：存储显示、双踪显示、插值显示、流动显示等。

存储显示是示波器最基本的显示方式，它显示的波形是由一次触发捕捉到的信号片断，随即稳

定地显示在 CRT 上。存储显示还有：连续捕捉显示和单次捕捉显示之分，在连续捕捉显示方式下，每满足一次触发条件，屏幕上原来的波形就被新存储的波形更新，而单次捕捉显示只保存并显示一次触发形成的波形。

如果需要显示两个电压波形并保持两个波形在时间上的原有对应关系，可采用交替存储技术以达到双踪显示。这种交替存储技术利用存储器写地址的最低位  $A_0$  来控制通道开关，使取样和 A/D 转换轮流对两通道输入信号进行取样和转换，其存储方式如图 3 所示，当  $A_0$  为 1 时，对通道 1 的信号  $Y_1$  进行采样和转换，并写入技术存储器单元中，读出时，先读偶数地址，再读奇数地址， $Y_1$  和  $Y_2$  信号便在 CRT 上交替显示。

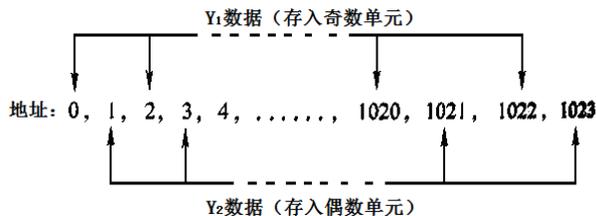


图 3 双踪显示的存储方式

示波器屏幕显示的波形由一些密集的点构成，当被观察的信号在一周期内采样点数较少时会引起视觉上的混淆现象，如图 4 左图所示的正弦波形就很难辨认，一般认为当采样频率低于被测信号频率的 2.5 倍时，点显示就会造成视觉混淆，为了有效地克服视觉的混淆现象，同时又不降低带宽指标，数字滤波器往往采用插值显示，即在波形上两个测试点数据间进行估值。估值方式通常有矢量插值法和正弦插值法两种，矢量插值法是用斜率不同的直线段来连接相邻的点，当被测信号频率为采样频率的 1/10 以下时，采用矢量插值可以得到满意的效果；正弦插值法是以正弦规律用曲线连接各数据点的显示方式，它能显示频率为采样频率的 1/2.5 以下的被测波形，其能力已接近奈奎斯特极限频率。

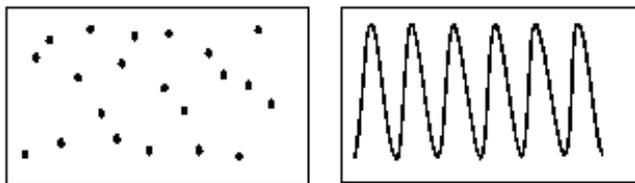


图 4 波形的插值显示

### 3. 信号的触发

为了实时稳定地显示信号波形，示波器必须重复地从存储器中读取数据并显示。为使每次显示的曲线和上一次重合，必须采用触发技术。信号的触发也叫整部或同步，一般的触发方式为：输入信号经衰减放大后分送至 A/D 转换器的同时也分送至触发电路，触发电路根据一定的触发条件（如

信号电压达到某值并处于上升沿)产生触发信号,控制电路一旦接收到来自触发电路的触发信号,就启动一次数据采集与RAM写入循环。

触发决定了示波器何时开始采集数据和显示波形,一旦触发被正确设定,它可以把不稳定的显示或黑屏转换成有意义的波形。示波器在开始收集数据时,先收集足够的数据用来在触发点的左方画出波形。示波器在等待触发条件发生的同时连续地采集数据。当检测到触发后,示波器连续地采集足够的数据以在触发点的右方画出波形。

触发可以从多种信源得到,如输入通道、市电、外部触发等。常见的触发类型有边沿触发和视频触发;常见的触发方式有自动触发、正常触发和单次触发。

#### 4. 用 x 轴时基测时间参数

在实验中或工程技术上都经常用示波器来测量信号的时间参数,如信号的周期或频率,信号波形的宽度、上升时间或下降时间,信号的占空比(宽度/周期)等。如雷达通过测量发射脉冲信号与反射(接收)脉冲信号的时间差来实现测距离,其他无线电测距、声纳测潜艇位置等,都属于这一原理。

设待测信号接 y 轴输入端,  $T_y$  是待测信号的周期,  $T_x$  是 x 轴扫描信号的周期, N 是一个扫描周期内所显示的待测信号的波形周期个数。如显示屏上显示 2 个信号波形,扫描信号的周期为 10ms,则待测信号的周期为 5ms。

示波器显示屏常显示出以厘米为间隔的分刻板, x 轴扫描信号的周期,实际上是以时基单位(时间/cm 或时间/度)来标示的,如水平方向上分刻板总宽为 10cm,则  $T_x$ ,由时基(时间/cm)乘上 10cm,如时基为 0.1ms/cm,则扫描信号的周期为 1ms。为此,在实际测量中,

$$T_x = \text{时基单位} \times \text{波形厘米数}$$

式中的波形厘米数,可以是信号一个周期的读数(可测待测信号的周期)、正脉冲(或负脉冲)的信号宽度的读数或待测信号波形的其他参数。

#### 5. 用李萨如图形测信号的频率

两个互相垂直的振动(有相同的自变量)的合成李萨如图形。如果将不同的正弦波信号分别输入到 y 轴和 x 轴的输入端,当两个信号的频率满足一定的关系时,在荧光屏上将显示出李萨如图形,可用测量李萨如图形的相位参数或波形的切点数来测量时间参数。

(1) 频率相同而振幅和相位不同时,两正交正弦电压的合成图形。设此两正弦电压分别为:

$$x = A \cos \omega t$$

$$y = B \cos(\omega t + \varphi)$$

消去自变时  $t$ ，得到的轨迹方程为：

$$\frac{x^2}{A^2} + \frac{y^2}{B^2} - \frac{2xy}{AB} \cos \varphi = \sin^2 \varphi$$

这是一个椭圆方程。当两个正交电压的相位差  $\varphi$  取  $0 \sim 2\pi$  的不同值时，合成的圆形如图 5 所示。

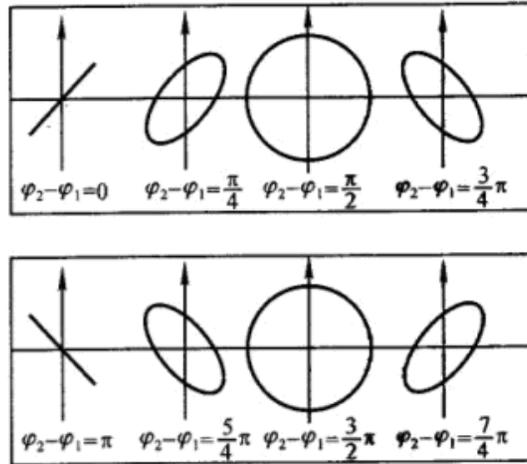


图 5 同频不同相位的李萨如图形

(2) 两正交正弦电压的相位差一定，频率比为一个有理数时，合成的圆形是一条稳定的闭合曲线。

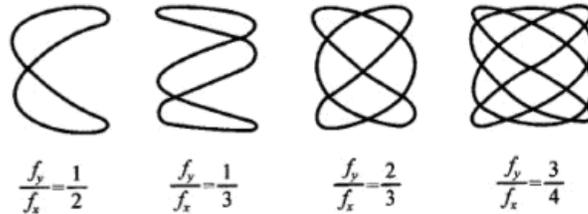


图 6 不同频率比的李萨如图形

图 6 是几种频率比时的图形，频率比与图形的切点数之间有下列关系：

$$\frac{f_y}{f_x} = \frac{\text{水平切线上的切点数}}{\text{垂直切线上的切点数}}$$

## 6. 脉冲波、上升时间与脉冲宽度

脉冲波是指一种间断的持续时间极短的突然发生的电信号。凡是断续出现的电压或电流称为脉冲电压或脉冲电流。

在控制领域中，上升时间是指响应曲线从零时刻到首次达到稳态值的时间。脉冲信号的上升时间是指脉冲瞬时值最初到达规定下限和规定上限的两瞬时之间的间隔。除另有规定之外，下限和上限

分别定为脉冲峰值幅度的 10% 和 90%。

脉宽是脉冲宽度的缩写，不同的领域，脉冲宽度有不同的含义。本实验中，脉冲宽度指的是脉冲峰值降低至一半时所对应的两个时刻差称为脉冲宽度。如下图所示。

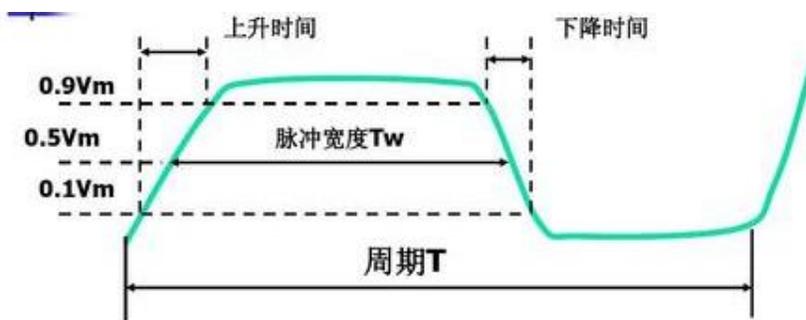


图 7 脉冲波部分参数概念图

## 实验内容

### 一、基础内容（必做）

#### 1. 用 x 轴的时基测信号的时间参数

- （1）使用从显示屏读数、示波器光标、示波器测量功能三种方法，测量示波器自备方波输出信号的周期（时基分别为  $100\mu\text{s}/\text{cm}$ ， $250\mu\text{s}/\text{cm}$ ， $500\mu\text{s}/\text{cm}$ ）。哪种时基测出的数据更准确？为什么？
- （2）使用示波器光标、示波器测量功能两种方法，选择信号发生器的非对称方波接 y 输入（占空比设为 70%，幅度和 y 轴量程任选），信号频率分别为 500Hz、5kHz，选择示波器合适的时基，测量各频率时的周期和正波的宽度（测量厘米数，注明 x 轴的时基）。求出频率和占空比，并与信号发生器的频率、占空比进行比较。
- （3）测量信号发生器的输出为 1kHz 脉冲波（脉冲宽度为  $200\mu\text{s}$ ，改变上升沿为 16.8ns、 $2\mu\text{s}$ 、 $20\mu\text{s}$ ），选择示波器合适的时基，观察并比较上升沿波形。并使用示波器光标、示波器测量功能两种方法测量上升沿为  $2\mu\text{s}$  时的上升时间及脉冲宽度，与信号发生器的上升时间、脉冲宽度进行比较。

#### 2. 观察李萨如图形并测量未知频率

- （1）探究不同参数对李萨如图形的影响

本地信号发生器 Output1、Output2 均产生 1kHz， $V_{pp}=4\text{V}$  的正弦波，Output1 相位设为  $90^\circ$ ，Output2 相位设为  $0^\circ$ ，分别送入示波器 CH1、CH2 通道。示波器显示方式为“XY”。将李萨如图形调整至面板中央，图形大小合适。

(a) 调节时基分别为  $25\mu\text{s}/\text{cm}$ ,  $50\mu\text{s}/\text{cm}$ ,  $500\mu\text{s}/\text{cm}$ ,  $5\text{ms}/\text{cm}$ ,  $10\text{ms}/\text{cm}$ , 观察现象并记录波形。  
(b) 选择合适时基, 在  $0^\circ \sim 180^\circ$  范围内连续调节 Output1 相位, 观察李萨如图形变化规律, 分别记录  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $135^\circ$ ,  $180^\circ$  时的李萨如图形。

(c) Output1 相位设为  $0^\circ$ , 调节 Output1 频率分别为  $1500\text{Hz}$ 、 $2000\text{Hz}$ , 观察并记录李萨如图形;

(2) 用李萨如图形测未知信号源正弦波的频率

公用信号发生器产生待测正弦波, 接示波器 CH1 (x 轴输入)。本地信号发生器产生可调正弦波, 送入示波器 CH2 (y 轴输入)。调节本地信号频率, 使示波器屏上显示稳定清晰的李萨如图形, 使 X/Y 轴切点数之比为:  $2/3$  或  $3/4$ 。记录李萨如图形的 X 轴、Y 轴切点个数, 记录本地信号源正弦波频率  $f_y$ , 计算公用信号源产生的正弦波频率  $f_x$ 。

要求: 公用信号发生器已调好, 请勿自行调节。根据切点位置, 手绘李萨如图形。观察李萨如图形时, 通过本地信号发生器的频率微调旋钮, 使李萨如图形尽可能稳定时, 再读 y 轴和 x 轴的切点数。

## 二、提升内容 (选做)

探究不同参数对李萨如图形的影响 (提升)

本地信号发生器 Output1、Output2 分别产生  $1\text{kHz}$  和  $2\text{kHz}$  的正弦波,  $V_{pp}=4\text{V}$ , 相位  $0^\circ$ , 分别送入示波器 CH1、CH2 通道。示波器显示方式为 “XY”。将李萨如图形调整至面板中央, 图形大小合适。

(a) 保持 Output1 相位  $0^\circ$  不变, 在  $0^\circ \sim 180^\circ$  范围内连续调节 Output2 相位, 观察李萨如图形变化规律, 分别记录  $0^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $120^\circ$ ,  $180^\circ$  时的李萨如图形。

(b) 保持 Output2 相位  $0^\circ$  不变, 在  $0^\circ \sim 90^\circ$  范围内连续调节 Output1 相位, 观察李萨如图形变化规律, 观察  $0^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $90^\circ$  时的李萨如图形, 与上一步骤中记录的结果相对照。

分析上述现象产生的原因。

## 三、进阶内容 (选做)

相关背景知识参见《附录 1》。

1. 选择信号发生器的两个输出信号为正弦波, 频率相等 (均为  $1\text{kHz}$ ), 相位差分别调节为  $0^\circ$ 、 $90^\circ$ 、 $180^\circ$ , 使用示波器的数学功能进行波形叠加, 观察并画出叠加后得到的波形;

2. 选择信号发生器的两个输出信号为正弦波, 频率分别为  $1\text{kHz}$  和  $1.5\text{kHz}$ , 调节相位差分别为  $0^\circ$ 、 $90^\circ$ 、 $180^\circ$ , 振幅为等幅和不等幅, 设计方案使波形稳定下来, 使用示波器的数学功能进行波形叠加, 观察并画出叠加后得到的波形。

## 四、高阶内容（选做）

本地信号发生器 Output1、Output2 分别产生 1kHz 和 2kHz 的正弦波， $V_{pp}=4V$ ，相位  $0^\circ$ ，分别送入示波器 CH1、CH2 通道。示波器显示方式为“XY”。将李萨如图形调整至面板中央，图形大小合适。

保持 Output2 频率不变，分别在 999.9-999.0 和 1000.1~1001.0Hz 范围内缓慢改变 Output1 频率，观察李萨如图形的变化和运动规律，试分析产生的原因。

## 注意事项

- 1 注意人身安全。不得用手直接触摸电路中的导电部分。实验中信号源输出电压不得超过 15V。
- 2 注意仪器的使用安全。连接和取下信号源、示波器的连接电缆线时，按老师指导方法操作，不得粗暴拉拔，损坏电缆。
- 3 离开之前请将实验台收拾到初始状态。

## 附录 1：提升内容（选做）相关背景知识

### 一、拍

当频率不同的两个波形叠加时，会产生拍的现象。设两信号为：

$$\begin{cases} x_1 = A_1 \cos(\omega_1 + \varphi_1) \\ x_2 = A_2 \cos(\omega_2 + \varphi_2) \end{cases}$$

为简单起见，设  $A_1 = A_2 = A$ ，则叠加波形为：

$$\begin{aligned} x &= x_1 + x_2 = A[\cos(\omega_1 + \varphi_1) + \cos(\omega_2 + \varphi_2)] \\ &= 2A \cos\left(\frac{\omega_1 - \omega_2}{2}t + \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{2}\right) \cos\left(\frac{\omega_1 + \omega_2}{2}t + \frac{\varphi_1 + \varphi_2}{2}\right) \end{aligned}$$

当  $\omega_1, \omega_2$  相差不多时，即

$$|\omega_1 - \omega_2| \ll \omega_1, \omega_2$$

$$\frac{\omega_1 + \omega_2}{2} \approx \omega_1, \omega_2$$

此时有

$$x = 2A \cos\left(\frac{\omega_1 - \omega_2}{2}t + \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{2}\right) \cos\left(\omega_1 t + \frac{\varphi_1 + \varphi_2}{2}\right)$$

此叠加波形的频率与原来两振动频率几乎相等，而振幅随时间的变化由  $\cos\left(\frac{\omega_1 - \omega_2}{2}t + \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{2}\right)$  决

定，由于振幅所涉及的是绝对值，故其变化周期即  $|\cos\left(\frac{\omega_1 - \omega_2}{2}t\right)|$  的周期，故振幅变化率为：

$$f = \frac{\omega_1 - \omega_2}{2\pi} = f_1 - f_2 = \Delta f$$

即两频率之差，这一现象称为拍， $\Delta f$  称为拍频，其波形图如图 8 所示。当两波形的振幅不等时，也有拍现象，此时合振幅仍有时大时小的变化，但不会达到零。

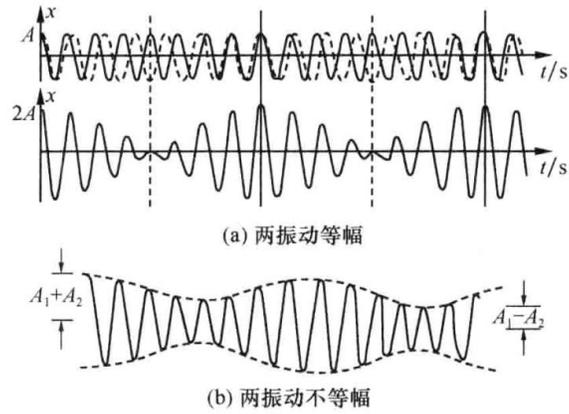


图 8 拍的波形图

## 二、外部触发：

在示波器输入为两个不同频率的波形信号时，由于示波器内部触发是以两个被测信号的一个作为触发信号，所以另一被测信号的波形将会不稳定，不利于示波器的使用，在这种时候，我们就需要使用示波器的外部触发功能。

外部触发使用外加信号作为触发信号，外加信号从外触发输入端输入。外触发信号与被测信号间应具有周期性的关系（一般外触发信号周期为被测信号周期的公倍数）。由于被测信号没有用作触发信号，所以何时开始扫描与被测信号无关，这样就可以实现两个被测波形同时稳定地显示。

## 三、实验仪器与步骤

（待补充）

## 附录 2：数据记录参考表格（物理量单位请自行选择）

### 1、示波器自备方波周期测量

时基				
直接测量	波形厘米数			
	周期 (ms)			
用光标测量 (ms)				
用测量功能测量 (ms)				

### 2、测量信号发生器的非对称方波

频率								
时基								
测量量	周期 (ms)	正波宽 度(ms)	频率 (Hz)	占空比	周期 (ms)	正波宽 度(ms)	频率 (Hz)	占空比
用光标测量								
用测量功能测量								

### 3、测量信号发生器的输出为 1kHz 脉冲波

上升沿		
时基		
测量量	上升时间( $\mu$ s)	脉冲宽度( $\mu$ s)
用光标测量		
用测量功能测量		

其他内容，请自拟格式，用列表法记录数据（含实验现象）。不要求表格线。

落球法测定液体的粘度

# 1423粘滞系数预习 测试



长按识别二维码

## 一、实验简介

一种液体相对于其他固体、气体运动，或同种液体内各部分之间有相对运动时，接触面之间存在摩擦力。这种性质称为液体的粘滞性。这种摩擦力也称为粘滞力。

粘滞系数（粘度）是液体的重要性质之一，它反映液体流动行为的特征。粘度与液体的性质，温度和流速有关，因此粘度的测量在工程技术方面有着广泛的使用价值。

测量液体粘度方法有多种，如落球法、转筒法、毛细管法等，其中落球法是最基本的一种，它可用于测量粘度较大的透明或半透明液体。

## 二、实验原理

### 斯托克斯公式

当半径为  $r$  的光滑圆球，以速度  $V$  在均匀的无限宽广的液体中运动时，若速度不大，球也很小，在液体中不产生涡流的情况下，斯托克斯指出，球在液体中所受到的阻力为

$$F = 6\pi\eta r v$$

阻力的大小和物体运动速度成比例，式中  $\eta$  为液体的粘度

## 三、实验方法

当质量为  $m$ ，体积为  $V$  的小球在密度为  $\rho_0$  的液体中下落时，作用在小球上的力有三个，球开始下落时，速度很小，阻力不大。小球作加速下降。随着速度的增加，阻力逐渐加大，速度达一定值时，阻力和浮力之和将等于重力，那时物体运动的加速度等于零，小球开始匀速下落，即

$$mg = \rho_0 Vg + 6\pi\eta r v$$

此时的速度称为终极速度。

$$\eta = \frac{(m - \rho_0 V)g}{6\pi r v}$$

### 雷诺数的影响

斯托克斯公式是假设在无涡流的理想状态下导出的。实际小球下落时不能是这样理想状态，因此还要进行修正，已知这时的雷诺数为  $Re = \frac{2rv\rho_0}{\eta}$

斯托克斯公式修正为

$$F = 6\pi\eta r v \left( 1 + \frac{3}{16} Re - \frac{19}{1080} Re^2 + \dots \right)$$

### 容器壁的影响

在一般情况下，小球在容器半径为  $R$ 、液体高度为  $h$  的液体中下落，液体在各个方向上都是无限广阔的这一假设条件是不能成立的。因此，考虑到容器壁的影响，斯托克斯公式变为

$$F = 6\pi\eta r v \left( 1 + 2.4 \frac{r}{R} + 3.3 \frac{r}{h} + \frac{3}{16} Re - \frac{19}{1080} Re^2 + \dots \right)$$

$$\eta \text{ 的表示 } \frac{4}{3} \pi r^3 (\rho - \rho_0) g = 6\pi\eta r v \left( 1 + 2.4 \frac{r}{R} + 3.3 \frac{r}{h} + \frac{3}{16} Re - \frac{19}{1080} Re^2 + \dots \right)$$

式中  $\rho$  为小球的密度， $g$  为重力加速度，由上式得

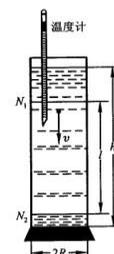
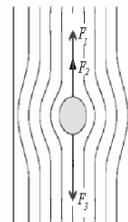


图 5.2.2-1 落球法测量液体粘度装置图

$$\eta = \frac{1}{18} \frac{(\rho - \rho_0)gd^2}{v(1 + 2.4\frac{d}{2R})(1 + 3.3\frac{d}{2h}) \left(1 + \frac{3}{16}Re - \frac{19}{1080}Re^2 + \dots\right)}$$

当  $Re < 0.1$  时,  $\eta_0 = \frac{1}{18} \frac{(\rho - \rho_0)gd^2}{v(1 + 2.4\frac{d}{2R})(1 + 3.3\frac{d}{2h})}$

当  $0.1 < Re < 0.5$  时,  $\eta_1 = \eta_0 - \frac{3}{16}dv\rho_0$

当  $Re > 0.5$  时,  $\eta_2 = \frac{1}{2}\eta_1[1 + \sqrt{1 + \frac{19}{270}(\frac{dv\rho_0}{\eta_1})^2}]$

做数据处理时, 必须对  $Re$  进行验算, 确定它的范围并进行修正, 得到符合实验要求的粘度值。

## 四、实验内容

- 1、设计寻找小球匀速下降区的方法, 测出其长度  $l$ ;
- 2、用螺旋测微器测定 3 个同类小球(每一类 6 个球)的直径, 并且利用电子天平称其质量, 记录数据, 数据处理时分别取其直径和质量的平均值;
- 3、将一个小球在量筒中央尽量接近液面处轻轻投下, 使其进入液面时初速度为零, 测出小球通过匀速下降区  $l$  的时间  $t$ , 重复 6 次, 取平均值, 然后求出小球匀速下降的速度。
- 4、用相应的仪器测出  $R$ 、 $h$  和  $\rho_0$  (至少应各测量三次) 及液体的温度, 温度  $T$  应取实验开始时的温度和实验结束时的温度的平均值。
- 5、计算雷诺数  $Re$ , 并根据雷诺数的大小, 进行一级或二级修正。

## 五、其他实验

### ➤ 提升实验

选用不同形状的物体, 如圆柱体、圆片代替小球

- 1、研究物体在液体里下落规律
- 2、找出适用的运动方程
- 3、测量液体的粘度并和落球法进行比较

### ➤ 进阶实验

利用小球做谐振动测定液体的粘滞系数

### ➤ 高阶实验

用手机拍摄视频, 用 Tracker 软件处理数据

## 六、实验注意事项

- 1、量筒内的待测油需经长时间的静止放置, 以排除气泡;
- 2、要使液体始终保持静止状态, 在实验过程中不可捞取小球扰动液体;
- 3、小球应该从容器正中央投下, 初速度为零, 测量时视线应该水平, 一个投完以后应该等一会投另一个;
- 4、寻找匀速下降区(要有详细的寻找方法);

## 思考题

1. 假设在水下发射直径为 1m 的球形水雷，速度为 10m/s，水温为 10℃， $\eta = 1.3 \times 10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ ，试求水雷附近海水的雷诺系数。
2. 设容器内  $N_1$  和  $N_2$  之间为匀速下降区，那么对于同样材质但直径较大的球，该区间也是匀速下降区吗？反过来呢？
3. 落球法所采用的测液体粘滞系数的方法对哪些液体适用？
4. 什么是雷诺系数？说明其物理意义，结合以上实验，分析其影响。

液体表面张力系数测定

# 1423表面张力系数 预习测试



长按识别二维码

## 一、实验简介

液体具有尽量缩小其表面的趋势，好象液体表面是一张拉紧了橡皮膜一样。把这种沿着表面的、收缩液面的力称为表面张力。表面张力的存在能说明物质处于液态时所特有的许多现象，比如泡沫的形成、润湿和毛细现象等等。

测定液体表面张力的方法很多，常用的有焦利氏秤法（拉脱法）、毛细管法、平板法、滴重法、最大泡压法等。

本实验采用焦利氏秤法（拉脱法）。该方法的特点是，用秤量仪器直接测量液体的表面张力，测量方法直观，概念清楚。

## 二、实验原理

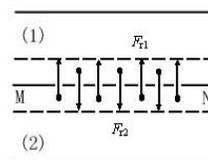
液体表面层（其厚度等于分子的作用半径）内的分子所处的环境跟液体内部的分子是不同的。

表面层内的分子合力垂直于液面并指向液体内部，所以分子有从液面挤入液体内部的倾向，并使液体表面自然收缩

想象在液面上划一条直线，表面张力就表现为直线两旁的液膜以一定的拉力相互作用。拉力  $F$  存在于表面层，方向恒与直线垂直，大小与直线的长度  $l$  成正比，

$$\text{即 } F = \sigma l$$

式中  $\sigma$  称为表面张力系数，它的大小与液体的成分、纯度、浓度以及温度有关。



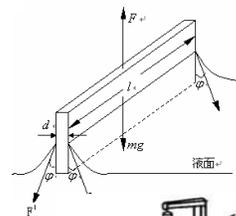
## 三、实验方法

金属丝框缓慢拉出水面的过程中，金属丝框下面将带起一水膜，当水膜刚被拉断时，诸力的平衡条件是

$$F = mg + 2F'$$

$$\text{而 } F' = \sigma l \text{ 得到 } \sigma = \frac{F - mg}{2l}$$

焦利秤的构造如图所示，它实际上是一种用于测微小力的精细弹簧秤。一般的弹簧秤都是弹簧秤上端固定，在下端加负载后向下伸长，而焦利秤与之相反，它是控制弹簧下端的位置保持一定，加负载后向上拉动弹簧确定伸长值。



### 三线对齐

为了保证弹簧下端的位置是固定的，必须三线对齐，即玻璃圆筒 E 上的刻线、小平面镜上的刻线、E 上的刻线在小平面镜中的象，三者始终重合。

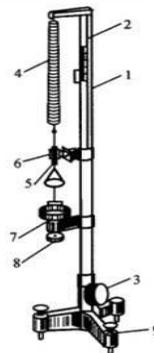
在力  $F$  作用下弹簧伸长  $\Delta l$ ，根据虎克定律可知，在弹性限度内  $F = k \Delta l$ ，将已知重量的砝码加在砝码盘中，测出弹簧的伸长量，由上式即可计算该弹簧的  $k$  值，由  $k$  值就可测外力  $F$ 。

## 四、实验内容

### 1、确定焦利氏秤上锥形弹簧的劲度系数

(1) 把锥形弹簧，带小镜子的挂钩和小砝码盘依次安装到秤框内的金属杆上。调节支架底座的底脚螺丝，使秤框竖直，小镜子应正好位于玻璃管中间，挂钩上下运动时不致与管摩擦。

(2) 逐次在砝码盘内放入砝码，每次增量 0.5g 的砝码，从 0.5g~5g 范围内增加。每次操作都要调节升降钮，做到三线对齐。记录升降杆的位置读数。用最小二乘法或作图法计算



焦利氏秤装置图

1—秤框；2—升降金属杆；3—升降钮；4—锥形弹簧；5—带小镜子的挂钩；6—平衡指示玻璃管；7—平台；8—平台调节螺丝；9—底脚螺丝

出弹簧的劲度系数。

## 2、用金属圈测量自来水的表面张力系数

(1) 用直尺测量金属圈的直径距离  $d$ ;

(2) 取下砝码，在砝码盘下挂上已清洗过的金属圈，仍保持三线对齐，记下此时升降杆读数  $I_0$ ；

(3) 把盛有自来水的烧杯放在焦利氏秤台上，调节平台的微调螺丝和升降钮，使金属圈浸入水面以下；

(4) 缓慢地旋转平台微调螺丝和升降钮，注意烧杯下降和金属杆上升时，始终保持三线对齐。当液膜刚要破裂时，记下金属杆的读数。测量 5 次，取平均，计算自来水的表面张力系数和不确定度。

## 3、用金属丝测量洗洁精的表面张力系数

(1) 用直尺测量金属丝两脚之间的距离  $s$ ;

(2) 取下砝码，在砝码盘下挂上已清洗过的金属丝，仍保持三线对齐，记下此时升降杆读数  $I_0$ ；然后重复上述 2 中的步骤(3)和(4)步骤即可；

### ➤ 提升实验

利用金属丝测量不同浓度的洗洁精的表面张力系数（至少 3 个不同浓度），得出浓度与表面张力的关系曲线。

## 五、其他实验

### ➤ 进阶实验

测量其它单一液体如酒精等的表面张力系数。

### ➤ 高阶实验

测定混合液体表面张力系数（1、药液，2、饮料，3、水中加金属，4、日常生活用品如盐水、糖水、酱油、醋等）。

## 六、实验注意事项

1、始终保持三线对齐。

2、小镜子不要和玻璃管摩擦。

3、焦利氏秤的锥型弹簧，先测量弹性系数  $K$ （最小二乘法或作图法）

4、金属丝缓慢拉出液面直至破裂

5、配件较多，保持配件的完好。

## 思考题

1. 焦利氏秤法测定液体的表面张力有什么优点？

2. 焦利氏秤的弹簧为什么做成锥形？

3. 拉托法测定液体表面张力系数存在哪些误差。

## 实验说明

本实验室为大学物理基础实验中的观察、体验和认知系列实验，实验室现有各类实验项目 30 多项，多数实验项目都与生活中一些物理现象密切相关。第一次在本实验室上课时上课教师会根据每位同学的组内序号分配对应的实验台，例如组内 1 号同学第一次课时首先完成 1 号实验台上的实验。完成该实验之后可自由选择其他实验，要求两次课一共至少完成 15 项实验项目。

**每次实验上课前请完成实验预习题，扫描下方二维码即可进入填写实验预习题。**



实验课堂上请注意以下事项：

- (1) 不了解如何进行实验时请咨询老师。
- (2) 不要直视激光器出射激光，避免对视力造成伤害。
- (3) 使用加热装置时小心不要被烫伤。
- (4) 每个实验有固定的实验台，实验中请不要到其他实验台拿取材料。

也可以根据每个实验项目内容自己设计实验方案，具体可以和当堂教师讨论。

本实验室无需提交特定实验的实验报告，需要提交实验总结—一般不超过两页 A4 纸，可包括实验感受、建议、或设计提出一项新实验。

实验课结束后，请扫描实验室门口张贴的二维码，**进入并完成实验课后题。**

## 物理实验-观察和体验

### 1. 单摆、耦合摆和牛顿摆

实验器材：定点固定或者框架，细绳，摆球，直接使用水果等球状物体，大小角度，圆锥摆。

实验说明：

摆的等时性是计时装置的基本原理。在固定点悬挂绳子，下端链接小球等物体可组建简单的单摆装置，在小角度下单摆的运动可近似认为符合简谐运动规律。大角度或者考虑摆球空气阻力时摆的运动规律更为复杂。研究单摆运动的规律可以精确测量重力加速度。

耦合摆系统可以模拟自然界中存在相互作用的振动体系，耦合摆运动过程的周期与其偶和度有关。在两个单摆装置中间连接物体的方式可以构成简单的耦合摆。

牛顿摆是利用单摆基本结构构成的周期碰撞过程演示装置，牛顿摆直观的展示了动量和动能守恒原理。



待研究问题：

1. 观察不同结构机械摆的周期性摆动。
2. 尝试采用视频追踪方法分析运动轨迹。
3. 分析周期性摆动中的能量转换过程。

### 2. 同步节拍器

实验器材：多个节拍器，平板，两根圆柱支撑

实验说明：

当几个节拍器被放置在由可自由滚动圆柱支撑的平板上时，通过平板可产生能量的传递现象，节拍器之间振动相互耦合，最终形成“同步”。在只有两个节拍器参与的实验钟，一开始节拍器之间并不同步，会有一个节拍器摆锤先摆到最左边，摆锤运动产生等效逆时针力矩的时候，平板会带动平板对影响到另一个节拍器的摆动。两个节拍器在摆动过程中通过板子传递能量，直到节拍器的摆锤达到同样的摆幅，这就是节拍器同步现象。多个节拍器的耦合摆动过程其相位关系是较为复杂的，改变不同的实验条件例如节拍器个数，平板的约束方式、节拍器的相对位置等观察实验现象。



待研究问题：

1. 观察节拍器的同步现象。
2. 节拍器的数量、节拍器的相对位置，板子的材质等对实验现象的影响。

参考视频链接：

<https://v.qq.com/x/page/d0326031tjz.html>

<https://www.bilibili.com/video/av5637514/>

### 3. 观察长串小球链的惯性下落

实验器材：大杯子，2米左右一长串珠子

实验说明：

将一长串珠子放入一个较大杯子中，让链子的一端自由下降，可以观察到珠链不是简单地由于重力作用“流”到地面，而是像“喷泉”一样，在整个运动链子先自发地向上运动，然后再掉落至地面。



这些珠链可以看作是一系列连起来的杆，想象一根杆子被水平地放入容器中，之后的杆子的一端受到一个向上的拉力，这个力来自于已经脱离了容器的那部分珠链。如果只是一根杆，那么受力的一端便会发生旋转并抬起，另一端则变成朝下的。但是在珠链中，每个短杆（珠链）都与其他杆子连在一起，因此杆子的另一端会受到来自容器或者其他杆子的弹力，而这种反弹则提供了不规则的向上的推力。通过实验观察和思考珠链的下落过程的动力学原理。

待研究问题：

1. 观察小球链的下落过程。

2. 小球链的放置方式对该过程有无影响，探究在长链端部加上不同质量的重物对该过程的影响。

参考视频链接：

[https://v.youku.com/v\\_show/id\\_XNjY2Mzc5ODc2.html](https://v.youku.com/v_show/id_XNjY2Mzc5ODc2.html)

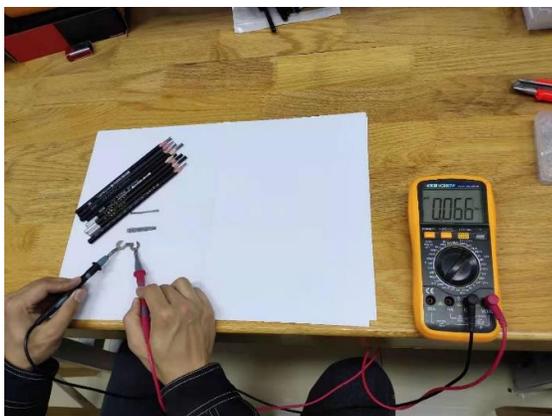
[https://v.youku.com/v\\_show/id\\_XNjY2NDI4NTEy.html](https://v.youku.com/v_show/id_XNjY2NDI4NTEy.html)

#### 4. 铅笔导电实验。

实验器材：白纸、不同参数的铅笔，万用表，电池

实验说明：

铅笔笔芯的主要成分是黏土和石墨，常用铅笔杆上会标有例如 HB，2B，4B 等的标号，这些标号代表的是铅笔芯的软硬程度，实际上代表的是笔芯中石墨和黏土的比例不同，石墨越多，则铅笔芯越软，画出来的线也越黑，从标号上看就是 B 数越高，而 H 数越高，则笔芯硬，相对来讲，就是黏土含量越高。层状石墨材料含有自由电子，含有石墨材料的笔芯可以导电，画在纸上的铅笔笔迹是否能也可以导电呢？



用铅笔在白纸上画上宽度相同、长度不同的痕迹，用万用表、电池和导线联起来，尝试观察和研究铅笔笔迹的导电现象。

待研究问题：

- 1.观察铅笔笔迹的导电现象
- 2.改变铅笔笔迹的长度、宽度，以及不同铅笔种类的导电性。

参考视频链接：

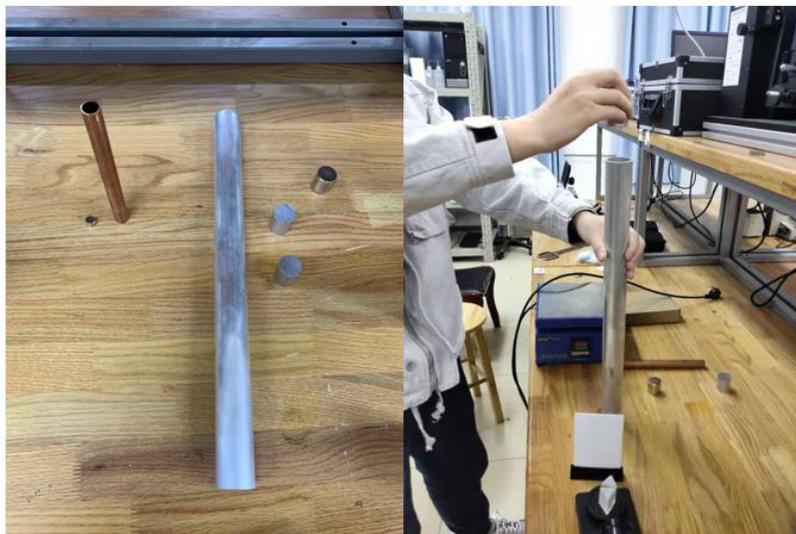
<https://v.qq.com/x/page/l3018dtew25.html>

### 5. 楞次定律-磁体沿着金属管下落

实验器材：圆柱铝块（直径小于铝管内径）、中空铝管、磁铁块（直径小于铝管内径）

实验说明：

磁性较强的小磁铁在铝管扣释放自由下落时，铝管中的磁通量发生改变，磁铁块上方铝管的磁通量减小，下方铝管的磁通量增大。铝管中将产生感应电流，感应电流产生的磁场反过来又将对下落的磁铁产生阻力作用，磁铁块在铝管中可能会有与自由落体规律不同的缓慢下落过程。由于普通铝块不能使铝管中磁通量发生变化，所以会做自由落体运动。



待研究问题：

分别将大小、形状相近的铝块和磁铁块从铝管管口释放，观察二者的下落过程有何不同。

#### 6. 表面张力系列实验：毛细管观察、铁丝圈棉线等、牛奶中麦圈的吸引

实验器材：毛细管，大烧杯，刻度尺、铁丝圈，棉线，肥皂水，牛奶、碗、麦圈

实验说明：

表面张力是液体表面存在的具有使液体表面可能面积缩小的力。表面张力是分子间作用力在表面处的一种表面效应。例如常见的露珠即可被认为是由表面张力凝聚起来的水滴。表面张力的大小与分界面的几何尺寸、液体的种类和温度等因素相关。通过观察液体在管中毛细管中的液面位置可以分析表面张力的作用机理，利用铁丝圈和棉线可通过肥皂水得到不同的形状液膜，观察和探究液体的表面张力现象。



在碗中盛放牛奶时，由于牛奶中的水分子被玻璃吸引，牛奶的表面在碗的边

缘向上弯曲。将麦片放入牛奶中时，容器边缘附近的麦片沿着弯曲液面向上浮动，看起来好像它们紧贴着边缘。由于表面张力，碗中间漂浮的麦圈使得牛奶的表面出现凹陷，凹陷附近液面产生了一个向内倾角。当两麦圈距离较近时，两个凹陷融合成一个，使得它们看起来像吸引在一起。

将毛细管插入水中，可以看到管中的水面比容器里的水面高，管子的内径越小则里面的水面越高。这种毛细现象是液体表面张力的一种表现形式。

铁线圈在肥皂水中浸润后会形成一层膜，将系好的棉线圈放在这层膜上会自动形成一个圆形。

在碗中倒入牛奶后放入麦片，会发现麦片可能有聚集在一起或者紧靠着碗的边缘的现象。

待研究问题：

- 1.观察生活中的表面张力现象，探究其作用力大小和方向有什么特点。
- 2.你还能想到哪些表面张力现象，设计实验来演示一下！

参考视频链接：

<https://v.qq.com/x/page/t0854v95nuj.html>

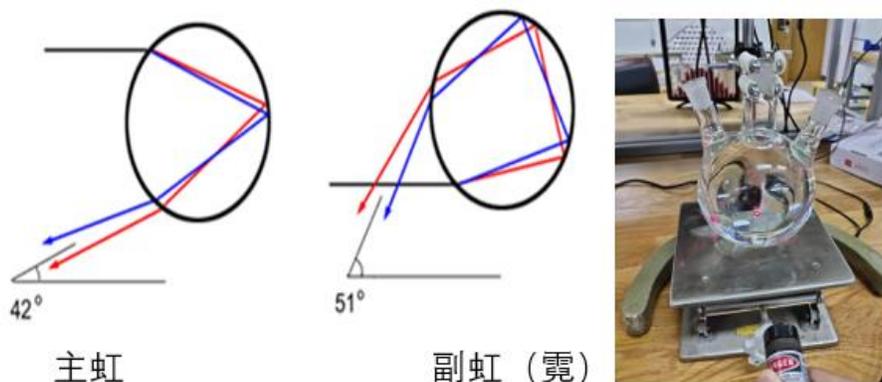
## 7. 光的色散与霓、虹

实验器材：大烧杯、雾化器、白光源（手电），镜子，长托盘

实验说明：

不同波长的光在介质中的折射率不同会导致光经过介质折射后会产生色散现象。

空气中存在大量的水分且尘粒较少，能见度较高时，太阳对面的天空中容易出现彩色圆弧，按一定顺序排列红、橙、黄、绿、蓝、靛、紫七种颜色。这就是虹（rainbow），即彩虹，它是气象学中的一种光学现象。即太阳光通过空气中的水滴时的折射和反射后形成的不同颜色排列的光带。霓（secondary rainbow），也称二级虹或者副虹，一般认为霓的色彩排列顺序与“虹”相反。



虹和霓可以认为是由于太阳光在水滴中经过一次和两个反射后出射形成的，由于白光经过水滴后发生两次反射的情况相比于发生一次反射时光能量损失很多，因而“霓”的亮度比“虹”的亮度暗得多，故将其称作副虹，而且其位置位于“虹”之上，霓下面才是主“虹”。实验中通过利用装满水的球形容器和激光器来探究光在水球中的反射和折射情况。

参考视频链接：

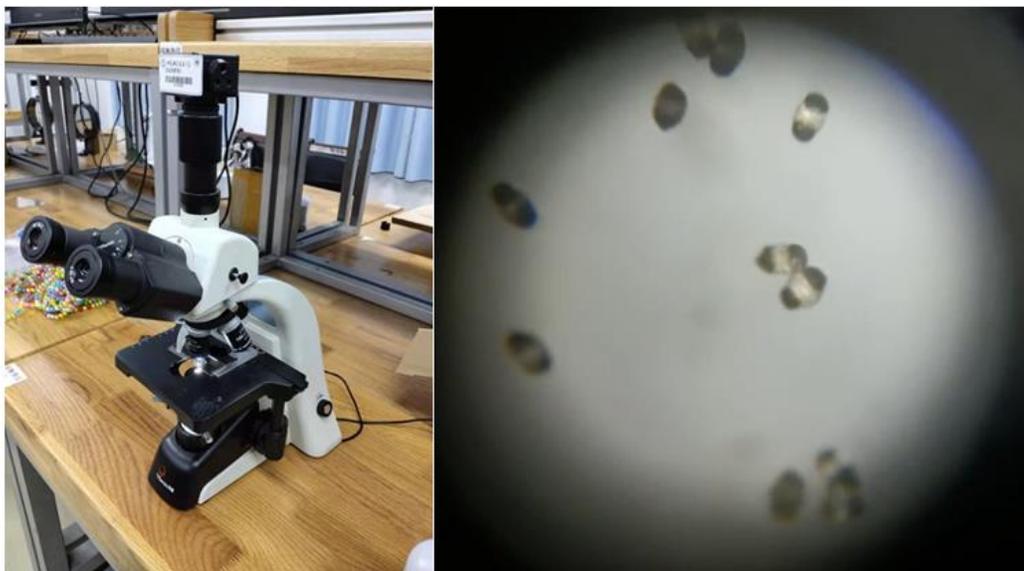
<https://www.bilibili.com/video/BV1vt411A786?from=search&seid=9007394674990562282>

## 8. 观察布朗运动

实验器材：显微镜，比色皿，花粉粉末，载玻片

实验说明：

布朗运动是 1827 年英国植物学家罗伯特·布朗利用显微镜观察悬浮于水中由花粉微粒时发现的，一般认为是微小粒子或者颗粒在流体中做的无规则运动。作布朗运动的微粒的直径一般为  $10^{-5}$ — $10^{-3}$  cm，这些小的微粒处于液体或气体中时，由于液体分子的热运动，微粒受到来自各个方向液体分子的碰撞，当受到不平衡的冲撞时而运动，由于这种不平衡的冲撞，微粒的运动不断地改变方向而使微粒出现不规则的运动。布朗运动的剧烈程度随着流体的温度升高而增加。在载玻片上滴一滴花粉悬浊液，在显微镜下可以观察布朗运动。



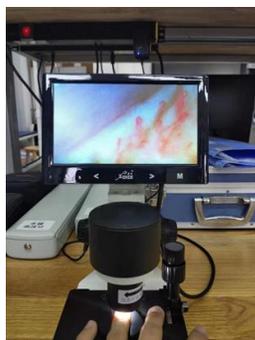
参考视频链接：[https://v.youku.com/v\\_show/id\\_XMzc5MDIxOTMzMg==.html](https://v.youku.com/v_show/id_XMzc5MDIxOTMzMg==.html)

### 9. 手指微循环显微观察

实验器材：显微镜，香柏油，棉签

实验说明：

微循环，就是人体微动脉和微静脉之间的血液循环。血液循环最根本的功能，就是进行血液和组织之间的物质交换。这个功能都是通过微循环实现的。使用高倍数显微物镜，在手指指甲附近涂抹香柏油，然后置于显微镜下观察，通过粗调节和细调节的方法确定具体的位置，观察手指微循环。



待研究问题：

1. 观察手指前端微循环现象。
2. 观察皮肤表面的水份蒸发现象。

参考视频链接：

<https://www.bilibili.com/video/BV1Wb41137Cz?from=search&seid=39697999>

49498408333

## 10. 镍片的磁性和居里温度

实验器材：架子（放置磁铁的和镍片），酒精灯，磁铁，高纯度镍片，冰块

实验说明：

许多物质在受到外磁场作用后，感生出与磁场同方向的磁化强度，可用磁化率 $\chi_m > 0$ 来描述其被磁化的难易程度。若材料的磁化率很小，磁化后仅显示出微弱的磁性，这种磁性称为顺磁性。而铁磁性物质的 $\chi_m$ 不仅大于0，而且数值很大，为 $10 \sim 10^6$ 数量级，在很小的磁场下，就可以被磁化到饱和。铁磁性物质的磁特性随温度的变化而改变。当温度升高到某一温度时，铁磁性材料就由铁磁状态转变为顺磁状态，即失去铁磁性物质的特性而转变为顺磁性物质，这个特定的温度称为居里温度，常以 $T_c$ 表示。

实验中可以观察镍片在磁铁磁化下的铁磁性现象。之后用酒精灯加热将镍片的温度升高，超过居里温度后其转变为顺磁性。之后用冰块给镍片降温，当镍片的温度降到居里温度之下时便会恢复铁磁性，被磁铁吸附，这样就可以观察到镍片在铁磁性和顺磁性间的转变过程。



待研究问题：

1. 观察当镍片达到居里温度时，镍片由铁磁性转为顺磁性相关实验现象。
2. 观察当温度降低以后，镍片是否会重新恢复铁磁性。
3. 进一步了解顺磁性和铁磁性的物理意义，用电磁学的方法进行理论分析。

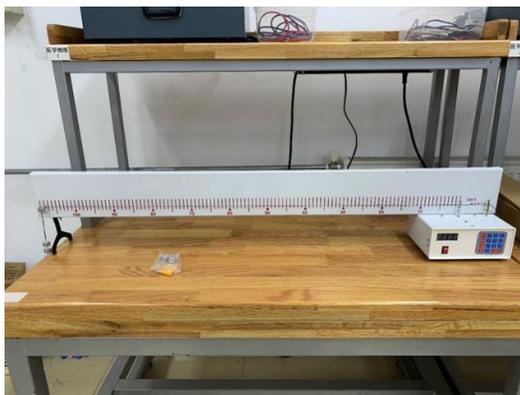
参考视频链接: <https://www.bilibili.com/video/av47651268/>

## 11. 驻波演示实验

实验器材: 绳波振动演示仪

实验说明:

当两个频率相同, 振幅相近的波在同一直线上相向传播时, 其叠加形成的波称为驻波, 驻波波形上出现许多振幅为零的节点, 称为波节, 相邻波节的距离为半个波长。



弦线的一端系在一个可调频率和振幅的上下振动振源上, 在振动装置一端通过定滑轮悬挂砝码, 弦线下端的砝码质量为  $m$ , 产生的张力为  $T = mg$ 。波源振动时, 弦线上形成了传播的机械横波。当波动传播到支架一端悬挂砝码的刀口位置时, 由于弦线在该点受到刀口支架的阻挡而无法振动, 当振源到刀口支架的距离  $L$  等于半波长的整数倍的时候, 可以观察到稳定的驻波。

待研究问题:

1. 观察实验中形成的驻波的特点。
2. 改变弦线的张力, 振动源的频率和振幅, 观察驻波的个数和形状会发生什么变化。
3. 从理论上分析驻波产生的原因, 并思考弦线和传递的横波波长满足什么关系时, 才会有驻波产生。
4. 思考是否可以采用其他方式来演示驻波。

参考视频链接: <https://v.qq.com/x/page/j03049m2m7i.html>

## 12. 滚瓶子实验

实验器材: 两个一样的玻璃瓶, 沙子, 水, 斜面。

实验说明:

在两个一样的玻璃瓶中装入质量相等的水和沙子,从相同斜面的同一高度释放滚落。在理想状态下,它们滚落过程的速度应该相同。但实验中考虑到沙子和瓶子的摩擦,水在瓶子中的流动碰撞、沙子和沙子的摩擦等过程。两个瓶子的滚动速度会出现差别,观察两个瓶子哪一个滚动的更快,分析这个过程中的能量损失。

待研究问题:

1.在两个瓶子中分别装满水和沙子,在相同的斜面上同一高度滚落,看哪个瓶子滚得更快。

2.在瓶子中装入等质量的水和沙子,在相同的斜面同一高度滚落,观察哪个瓶子滚落的更快。

3.改变斜面的倾斜度等,观察是否会对实验结果产生影响。

4.理论上分析,二者的滚落速度会有差异吗?产生差异的原因是什么?

### 13.发光二极管 LED 的光场分布

实验器材: LED 灯,透镜,大凹面镜

实验说明:

发光二极管(LED),是电能转换成光能的能量转换装置,也是现在重要的照明元件。制作 LED 的材料是 III-V 族化合物,如 GaAs(砷化镓)、GaAsP(磷砷化镓)、AlGaAs(砷化铝镓)等半导体制成,其核心结构是半导体 P-N 结,具有一般的 P-N 结伏安特性,即正向导通、反向截止、击穿的特性。它的发光是由半导体中的电子-空穴的复合产生的。LED 是一种直接注入电流的发光器件,半导体晶体内部受激电子从高能级回到低能级时会发射出光子。大量处于高能级的粒子各自分别自发发射的频率为  $\nu$  的光波:

$$\nu = \frac{E_g}{h}$$

其中  $E_g$  是半导体能带宽度,其单位是 eV。LED 器件已经成为重要的照明元件。LED 器件由于其结构特点存在固有的照明发散角度,设计各类照明灯具时需要根据选择的 LED 器件本身的照明特性来进行设计。



待研究问题：

- 1.观察 LED 照明的远场发散角
- 2.观察凹面镜和透镜对 LED 发光的汇聚效果。
- 3.观察不同颜色的 LED 光的发光，以及通过透镜后的照明效果。

#### 14.磁悬浮陀螺和(伯努利悬浮球)

实验器材：磁性陀螺、磁性底座、锥形喷气装置，小气球

实验说明：

磁铁具有同性相斥的特性。在磁性物质制作的陀螺下方放置一个同性的磁铁，陀螺便会受到磁力的作用被推向空中。但由于磁体的相互斥力在力平衡特性上属于不稳定平衡，稍微偏离平衡位置就会失去平衡，无法稳定悬浮在磁性底座上方。不旋转状态下，磁性陀螺一般不能在磁性底座上方稳定悬浮。

但旋转陀螺，然后缓慢地将托板抬起，将陀螺移动到稳定点后，移去托板。此时，陀螺所受重力和向上的磁力等大反向，陀螺受力平衡便会悬浮在空中。并且由于旋转的陀螺提供了额外的角动量，是的下方磁性底座上方的平衡位置与之前未旋转时不同，此时是一种稳定平衡。

.伯努利原理为流体的机械能守恒，即压强，重力势能和动能的和为常数。其推论为流动时，流速越大，压强就越小。可以用锥形喷气装置向上方喷气，将小气球拖入气流上方，则气球可以悬浮在空中。当小球由于扰动跳出气流时，因为小球附近的空气流速流速大，根据伯努利原理流速大的位置压力相对较小，会被周围空气压迫回原位。



待研究问题:

- 1.观察陀螺悬浮在空中的现象。
- 2.对陀螺进行受力分析，在实验过程中陀螺经常有向某一边飞出的现象，分析这个现象产生的原因。
- 3.如何改良装置以提高试验成功的几率。

参考视频链接：[https://v.youku.com/v\\_show/id\\_XNDIzODg1MDU5Mg==.html](https://v.youku.com/v_show/id_XNDIzODg1MDU5Mg==.html)

[https://v.youku.com/v\\_show/id\\_XMjg0MTQwMTM0OA==.html](https://v.youku.com/v_show/id_XMjg0MTQwMTM0OA==.html)

## 15.体验时间-生活中的时间

实验器材：手机秒表，机械秒表，电子秒表

实验说明：

时间是人类世界最基本的属性之一，感知和测量时间的方法一直伴随着人类科学的进步而不断演化。可以认为，时间是某种物理过程的度量。人们对于时间的测量方法的探索就是对更为普适和稳定的物理过程的探索。从古时太阳的东升西落和日月星辰的轮转，到现代晶体振荡和原子能级的寿命，都是各类不同的物理过程。古代的撒克逊人使用带孔的碗在水中的下沉过程来量度时间。对物理现象的研究和探索催生现代各种时间度量装置。

实验中观察单摆，自由落体、眨呀等过程的时间，使用不同的测量装置，机械秒表、电子表等测量和感知时间。



待研究问题:

1. 体验眨眼, 自由落体, 单摆等物理过程的时间间隔。
2. 用手机, 电子表等不同的设备体验时间这个物理量。
3. 了解更多物理过程所需时间的数量级。

#### 16. 体验重量-手感可分辨最低重量间隔

实验器材: 砝码一套, 哑铃一套。

实验说明:

在日常生活中的“重量”常用于表示“质量”, 但是在科学上, 这两个词表示物质不同的属性。

在牛顿定律的适用范围内, 可以认为一个物体的惯性质量决定它受力时的加速度。对于质量的测量和认知是认识客观世界的重要方面。可以通过多种物理方法测量物体的质量, 在重力场中可以使用各类秤来称重计算质量, 也可以利用外力使物体进入运动状态并进行测量来计算质量。



握持不同质量的哑铃时，能感受到其重量的明显的差异。而砝码的质量一般比较小，可以先握持一定质量的哑铃，通过向上加砝码，来感受质量的变化。加的砝码较小时，应该不会有明显的手感变化。不断提高砝码质量，感受到哑铃质量发生变化时，通过读取砝码的质量便可知道手感可分辨的最低重量间隔。

也可以尝试自己设计物理方法测量计算物体的质量。

待研究问题：

1. 分别体验不同砝码的质量，并用电子秤测量其质量。
2. 体验不同质量的哑铃，对其质量有直观的感受。
3. 用体重秤等测量自己的体重等。

### 17. 体验温度-加热和冷却

实验器材：加热台、酒精灯、金属块、水、温度测量装置（热成像仪）

实验说明：

温度是表示物体冷热程度的物理量，微观上来讲是物体分子热运动的剧烈程度。温度只能通过物体随温度变化的某些物理特性来间接测量，而用来量度物体温度数值的标尺叫温标。它规定了温度的读数起点（零点）和测量温度的基本单位。物质升温 and 降温过程从微观上说即是组成物质的分子热运动程度的变化过程，这个过程可通过热量的传导来实现。



热传导，是热能从高温向低温部分转移的过程，是一个分子向另一个分子传递振动能的结果。各种材料的热传导性能不同，传导性能好的，如金属，还包括了自由电子的移动，所以传热速度快，可以做热交换器材料，传导性能不好的，如石棉，可以做热绝缘材料。

待研究问题:

1. 在水和金属块的加热过程中各自出现什么现象。
2. 观察水和金属块升温 and 冷却过程中的快慢, 分析背后原因。

### 18. 体验视觉-目测最小分辨距离、三维立体卡片

实验器材: 分辨率卡片, 不同间隔的点、线、立体卡片

实验说明:

当光照射在物体上后, 会反射并散开。人眼和照相机将这些分散的光线重新聚合起来, 投射在一点上。如果眼睛的视网膜, 或者照相机的成像感应器正好处在光聚合的那个点上, 我们得到的图像就会是清晰的, 否则便会模糊失真。

视觉分辨率一般指一定距离下观察两个物体刚好能分辨开的间距。黑色背景下两个白点, 在距离 1m 和距离 2m 的地方看, 1m 的地方可能分开 0.291mm 就能分辨清楚, 而在 2m 的地方, 则要分开 0.582mm 以上才能看清楚是两个点, 小于这个距离, 它们就融为一点或者一条直线了。

一般用角分辨率来定义人眼的分辨率, 角分辨率用弧度做单位, 乘以距离, 就是空间分辨率了。人眼的理论分辨率是  $18\sim 20$  角秒, 但由于感光细胞分布和本身缺陷, 通常 2 角分已经是理想条件下较好的分辨能力了, 一般人在  $3\sim 5$  角分之间。

3D 卡是一种新型的三维图片模式, 卡面可以从不同角度看出不同的影像。卡片的视觉效果可以是深度的立体效果, 也可以具有缩放、位移、变圆的视觉效果, 完全不同于一般的印刷卡片。即结合多重影像于一体, 经由不同角度变化, 产生不同影像的变化。可以在不同距离观察三维立体卡片, 并目测出自己的最小分辨距离。



待研究问题:

1. 体验不同距离下的视觉分辨能力。
2. 观察 3D 卡片，调研其视觉作用原理。
3. 视觉成像的原理。

### 19. 体验盐和糖的质量和味觉

实验器材：不加碘和加碘食盐，白砂糖，烧杯，热水瓶，冷水。

实验说明：

我国颁布的《中国居民膳食指南》建议成年人每天盐的摄入量不超过六克据调查发现我国居民大约有 60%以上的人每日盐的摄入量是超标的。同时营养健康学家建议成年人一天摄入的糖控制在 50g 以下。现代人饮食习惯上偏向高糖高盐，实验中可体验糖和盐的量在不同温度时的味觉感知。

在烧杯中分别加入相同体积的热水和冷水，并定量分别加入不加碘和加碘食盐、白砂糖，观察三者热水和冷水中的溶解情况，分析各自的溶解度大小。最后分别品尝不加碘和加碘食盐、白砂糖。其中加碘食盐和不加碘食盐相比，多加了“碘酸钾( $KIO_3$ )”和“氯化钠( $NaCl$ )”两种物质。使用含碘盐可以防治碘类疾病的发生，如防治甲状腺类疾病。而不加碘盐，则没有这种效果，只能用作调味品。白砂糖是食糖的一种。其颗粒为结晶状，均匀，颜色洁白，甜味纯正，甜度稍低于红糖。其主要成分是蔗糖( $C_{12}H_{22}O_{11}$ )，由一分子葡萄糖和一分子果糖脱水缩合形成，易溶于水较难溶于乙醇，甜味仅次于果糖。



待研究问题:

1. 称量不同质量的食盐和白砂糖的量，了解生活常识。
2. 观察糖和盐在水中的溶解情况。
3. 体验不同浓度和种类盐和糖溶液咸和甜的程度。

## 20. 温差发电

实验器材：温差发电装置

实验说明：

金属中温度不均匀时，温度高处的自由电子比温度低处的自由电子动能大。像气体一样，当温度不均匀时会产生热扩散，因此自由电子从温度高端向温度低端扩散，在低温端堆积起来，从而在导体内形成电场，在金属棒两端便引成一个电势差，此即汤姆逊效应。其与塞贝克效应、帕尔贴效应一起构成热电转换的三个基本物理效应。



待研究问题：观察温差到电能的转换现象，研究相关参数。

## 21. 口罩对水和酒精的透过情况

实验器材：口罩、水、酒精

实验说明：口罩在这次新冠肺炎疫情防控中起到了重要的保护作用，典型的口罩材料采用的是熔喷聚丙烯，是典型的疏水性材料。水很难以液态形式渗透进纤维内部，不会与纤维中驻极体电荷发生作用。但气态形式的水汽却能顺利通过。所以，熔喷聚丙烯材料的口罩透气而不透水，既能保证人的正常呼吸，又能同时保持良好的防护性能。

口罩表面喷洒酒精会导致口罩的疏水性被破坏，这是因为，酒精作为表面活性剂，降低了水在口罩表面的表面张力。于是水滴就更易渗透进口罩内部了，宏

观上看就是口罩漏水了。

将没经过使用的一次性医用口罩的白色一面朝上，缓慢倒入清水，观察实验现象。再往口罩另一面均匀喷洒酒精，再次观察是否会有水滴滴落。



待研究问题：

1. 口罩防水和疏水性体验。
2. 口罩表面喷洒酒精对口罩防水性能的影响。

## 22. 认识眼镜的度数

实验器材：白屏、眼镜镜片、凸透镜和凹透镜各一个、卷尺

实验说明：透镜焦距  $f$  可以反应透镜折光本领的大小。焦距越短，折光本领越大。通常把透镜焦距的倒数叫做透镜焦度，用  $\Phi$  表示，即  $\Phi=1/f$ 。平时说的眼镜片的度数，则是镜片的透镜焦度乘以 100 的值，即眼镜的度数等于  $100/f$ 。因此测量眼镜的度数必须先测得镜片的焦距。

远视镜的镜片是凸透镜，把镜片放在阳光下，使光线与镜片垂直，调整镜片与地面的距离，使地面上的光点(或光斑)最小最亮，用刻度尺测量地面上的光点到凸透镜光心的距离，以米(m)为单位，用  $f$  表示，则镜片的度数等于  $100/f$ 。

近视眼镜的镜片是凹透镜，通常无法通过观察实像来测量计算其焦距，实验中设计简易方法快速准确测量近视镜的焦距。

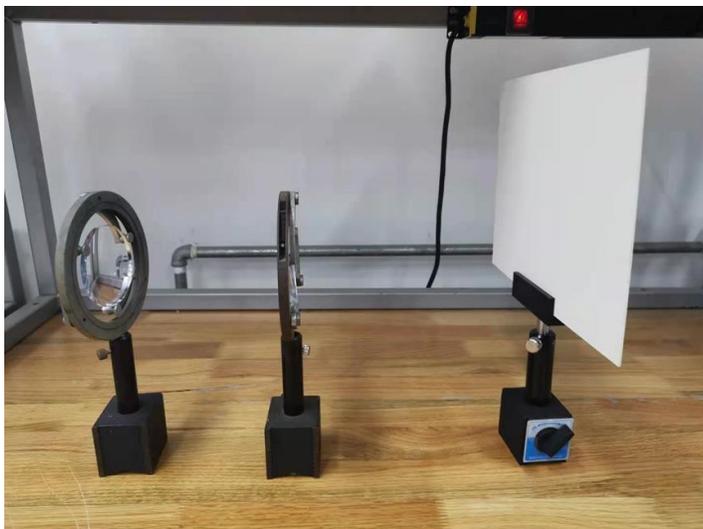
散光和近视都是由于屈光不正常导致的，都属于屈光不正。近视是在屈光静止的前提下，远处的物体只能在视网膜之前形成焦点，不能看清远处的物体。

散光通常与角膜弧度有关，角膜的弯曲度不均、厚薄不均都会导致光线不能准确聚焦在视网膜上。

近视主要表现为视物模糊，只能看清楚近处，无法看清远处；

散光主要表现为重影，即将一个点看成多个点，看远看近都模糊。

部分镜片具有矫正散光的能力，这时可以近似将这类镜片看作柱面镜或者看作两个棱镜拼接而成。



待研究问题：

1. 测量远视镜和近视镜的度数。
2. 设计方法估测镜片的散光度数。

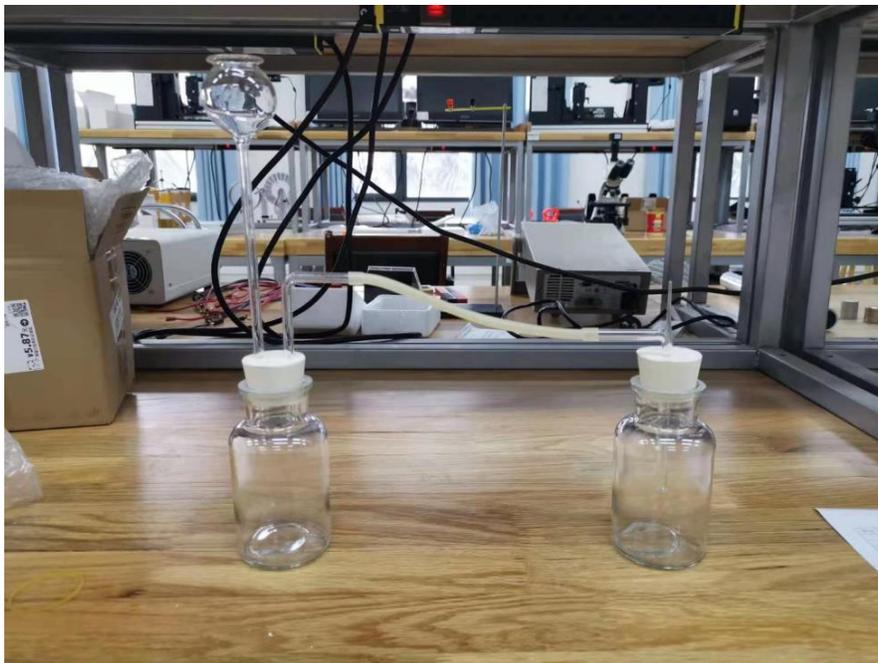
### 23. 气压、海伦喷泉和热水喷泉

实验器材：海伦喷泉装置，一个大烧杯、电热水器、吸管、马德堡半球

实验说明：

海伦喷泉是一种利用液体高度差产生喷泉的装置。

将部分装填热水的莫尔吸量管，用拇指按住吸量管的顶部，翻转莫尔吸量管，在吸量管的小口处会有水柱喷出，这就是热水喷泉现象。热水喷泉喷射是由于热水沿莫尔吸量管管壁流下，加热空气使得空气受热发生膨胀，挤压来不及下落的水，将这一部分水从莫尔吸量管的小口处喷射出来。



待研究问题:

1. 在实验中, 产生喷泉的原理是什么?
2. 调整瓶子的高度, 观察水柱高度的变化。
3. 水柱高度的变化和哪些因素有关。
4. 在热水喷泉中, 实验原理是什么?

参考视频链接: <https://haokan.baidu.com/v?vid=7035733942358343787>

## 24. 倒置瓶子实验-沉浮子

实验器材: 瓶子、水、回形针、吸管

实验说明:

通常将既能上浮也能下沉的物体称为沉浮子。他是利用阿基米德原理, 改变浮力大小实现升降的。将塑料瓶装水, 注意不能装满, 须在上方留出一部分空间, 将吸管剪成六七厘米的长度, 将吸管对折后用回形针夹紧上端(回形针主要起配重作用), 配重时需注意以塑料吸管一部分露出水面为宜。这时, 用力挤压塑料瓶, 塑料吸管就会下沉; 松开手时, 塑料吸管又会上升。

瓶中空气被压缩时, 压强增大, 沉浮子里进入一些水, 排水体积不变, 所受的重力大于它受到的浮力, 于是向下沉。松开瓶子, 瓶内水面上的空气体积增大, 压强减小。沉浮子里面被压缩的空气把水压出来, 此时排水体积增大, 沉浮子的

重力小于它所受的浮力，因此它就向上浮。浮沉子的浮沉是在外加压强作用下，靠改变它的排水体积来实现的。



待研究问题：

1. 当用力挤压瓶子时，沉浮子的上升和下降的原理。
2. 相同的沉浮子在不同溶液(纯水和盐水)中现象的区别。
3. 用力晃瓶子后，沉浮子的变化。
4. 潜水艇的升降原理和沉浮子一样吗？

参考视频链接：

<https://www.bilibili.com/video/BV1HJ41127xT?from=search&seid=6971981666658716608>

## 25.观察蜡烛燃烧

实验器材：蜡烛、烧杯、打火机

实验说明：

蜡烛的主要原料是石蜡是几种高级烷烃的混合物，主要是正二十二烷和正二十八烷。蜡烛易熔化，密度小于水难溶于水。受热熔化为液态，无色透明且轻微受热易挥发，可闻石蜡特有气味。遇冷时凝固为白色固体状，有轻微的特殊气味。

蜡烛燃烧并不是石蜡固体的燃烧，而是点火装置将棉芯点燃，放出的热量使石蜡固体熔化，再汽化，生成石蜡蒸气，石蜡蒸气是可燃的。

蜡烛被点燃时最初燃烧的火焰较小，逐渐变大，火焰分为三层（外焰、内焰、焰心）。焰心主要为蜡烛蒸气，温度最低，内焰石蜡燃烧不充分，温度比焰心高，因有部分碳粒，外焰与空气充分接触，火焰最明亮，燃烧充分，温度最高。



待研究问题：

- 1.观察蜡烛燃烧过程的火焰形状和结构。
- 2.了解蜡烛燃烧的基本过程。
- 3.探究蜡烛蜡油凹坑的形成和变化。

## 26.静电吸附-轻物体、泡泡或者液膜等

实验器材：静电橡胶棒、丝绸、泡沫、泡泡液、吸管、玻璃板

实验说明：

摩擦起电是电子由一个物体转移到另一个物体的结果，使两个物体带上了等量的电荷。得到电子的物体带负电，失去电子的物体带正电。任何两个物体摩擦，都可以起电。丝绸摩擦过的玻璃棒带的电荷叫正电荷，用毛皮摩擦过的橡胶棒带的电荷叫负电荷。



当一个带有静电的物体靠近另一个不带静电的物体时，没有静电的物体内部靠近带静电物体的一边会集聚与带电物体所携带电荷相反极性的电荷（另一侧产生相同数量的同极性电荷），由于异性电荷互相吸引，就会表现出“静电吸附”现象。

带正电荷的橡胶棒，靠近不带电的小纸片，小纸片靠近橡胶棒的一边会感应出负电荷（另一边感应出的是正电荷）；然后橡胶棒的正电荷与小纸片中的负电荷互相吸引，产生“静电吸附”现象。

待研究问题：

1. 体验使用橡胶棒和丝绸、毛皮等摩擦产生静电并用指针验电器检测。
2. 观察静电吸附现象。
3. 使用起电机产生静电，观察放电现象。
4. 思考产生静电的原理。

参考视频链接：

<https://www.bilibili.com/video/BV1Sa411c7xx?from=search&seid=8362550323220535020>

## 27. 折纸层数（软纸、硬纸）

实验器材：软纸和硬纸

实验说明：

折纸时每对折  $n$  次纸相当于把纸的厚度增到了  $2^n$  倍，而纸的宽度减到了  $1/2^n$  倍，这就意味着，一方面需要很大的力去折，另一方面折的纸的材料受力也有

个极限，所以折纸的层数一般有个限度，通常认为在七次左右。



用手将软的纸和硬的纸对折，看自己最多能折多少次，折多次后纸的厚度如何。

待研究问题：

1. 体验一张纸能折几次？
2. 体验软纸（卫生纸）和硬纸（A4 纸）折叠次数是否有区别？
3. 如果想多折几次，应该选取什么样的材料。
4. 想一些其他指数爆炸的例子？

参考视频链接：

<https://www.bilibili.com/video/BV1M7411e7D6?from=search&seid=14430380188137376238>

## 28. 手机探测红外源

实验器材：手机（自备），红外光源

实验说明：

通常红外光源波长为 800nm—1100nm，而人的眼睛可看到的只是可见光，波长范围在 440nm—760nm。所以即使夜间被红外摄像头偷拍，人也是很难觉察的。手机相机之所以可以探测到红外光，是因为相机的镜头内安装有硅探测器，硅的作用是成像和转化功能，将光信号转化为电信号记录在相机上，而硅探测器可吸收光源波长为 400nm—1100nm，所以利用智能手机的摄像头可捕捉到红外光源发出的光。



待研究问题：

- 1.人眼是否能直接观察到红外光。
- 2.通过手机摄像头能否探测到红外光？
- 3.思考为什么有的手机能看到，有的手机看不到。
- 4.将红外光源拿出盒子外，再观察现象。

参考视频链接：<https://www.bilibili.com/video/av30685653>

## 29.高尔顿板随机分布实验

实验装置：道尔顿板

实验说明：

将大量小球从道尔顿板顶部落下，看最终小球的分布。小球在碰到钉板的时候有一半的几率向左，一般的几率向右，一个小球从顶部落下位置是随机的。但是当大量的小球落下时，小球的位置最终会呈现一种正态分布。研究道尔顿板随机试验，更有利于我们理解自然界中很多正态分布的现象。

待研究问题：

- 1.观察道尔顿板的结构。
- 2.将小球从道尔顿板顶部释放，观察小球的最终分布。
- 3.分析道尔顿板结构对小球下落与最终分布的影响。
- 4.思考自然界中正态分布的现象。



参考视频链接：

<https://www.bilibili.com/video/BV1cV41187AF?from=search&seid=11006545975933883310>

### 30. 音叉和声音

实验器材：不同材料音叉，装有 phyphox 软件的手机。

实验说明：

不同材料的音叉振动带动口腔的发声。利用手机上 phyphox 软件来测量人的大喊和低声说话时声音的频率。音叉通过振动发出声音，我们人发声也是需要声带的振动，所以通过振动的传导可以带动口腔的发声。我们声音发出有高有低，有尖锐的有深沉的，这些声音可以通过 phyphox 软件来记录分析。

待研究问题：

1. 下载 phyphox 软件，熟悉其功能，测量人发出的声音特征参数。
2. 观察不同音叉并敲击，用 phyphox 软件测量其频率。
3. 感受音叉对口腔的共鸣。
4. 音叉的共鸣。



参考视频链接:

<https://www.bilibili.com/video/av83305522/>

<https://www.bilibili.com/video/av968658308/>

### 31. 太阳能电池

实验装置: 太阳能电池板类简单机械, 手电筒或者手机自带照明

实验说明:

太阳电池是一种可以将能量转换的光电元件, 其基本构造是运用 P 型与 N 型半导体接合而成的。半导体最基本的材料是“硅”, 它是不导电的, 但在半导体中掺入不同的杂质, 就可以做成 P 型与 N 型半导体, 再利用 P 型半导体有个空穴(P 型半导体少了一个带负电荷的电子, 可视为多了一个正电荷), 与 N 型半导体多了一个自由电子的电位差来产生电流, 所以当太阳光照射时, 光能将硅原子中的电子激发出来, 这些电子和空穴均会受到内建电场的影响, 分别被 N 型及 P 型半导体吸引, 而聚集在两端。此时外部如果用电极连接起来, 形成一个回路, 这就是太阳电池发电的基本原理。实验中用手电筒或手机自带照明照射太阳能电池板, 来观察太阳能电池板的电能输出情况。



待研究问题：

- 1.观察太阳能电池板的结构。
- 2.观测太阳能电池板对电能的转化。
- 3.用手机闪光灯照射太阳能电池板，观察其输出电压变化，用万用表测量。

### 32. 光的反射、折射和颜色合成。

实验器材：凸透镜、凹透镜、线光源、三原色演示器

实验说明：

光入射到介质表面时会发生反射和折射现象。各类透镜和棱镜即是利用光在介质中的折射现象来改变光的传播方向。

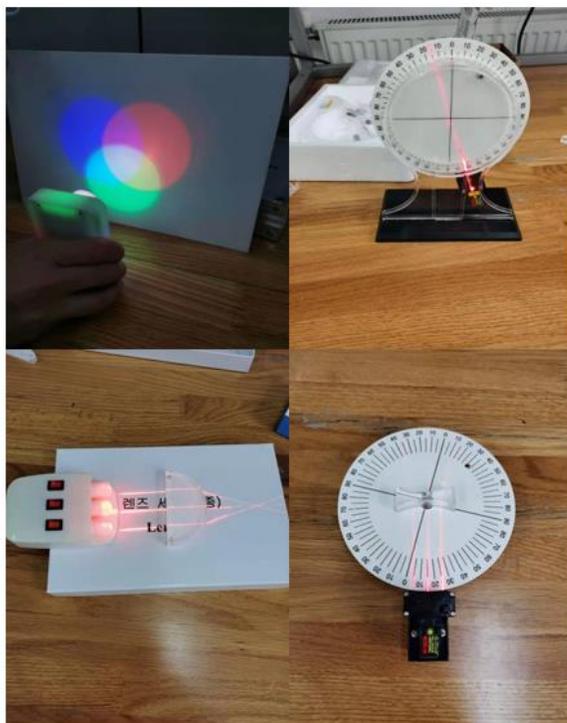
凸透镜能使入射平行光会聚而凹透镜能使入射平行光发散。

反射光和折射光的传播方向需要满足反射定律和折射定律。

常见的颜色合成所需三原色为红色、绿色和蓝色，调整三原色的光强可合成所有的颜色。

待研究问题：

- 1.观察光的三原色合成。
- 2.观察光的反射、折射、全反射、光路的可逆性等。
- 3.观察光经过凹凸面镜的现象，汇聚、发散、像差等。



参考视频链接：

<https://www.bilibili.com/video/BV1Jh411X7jj?from=search&seid=11939918898470800808>

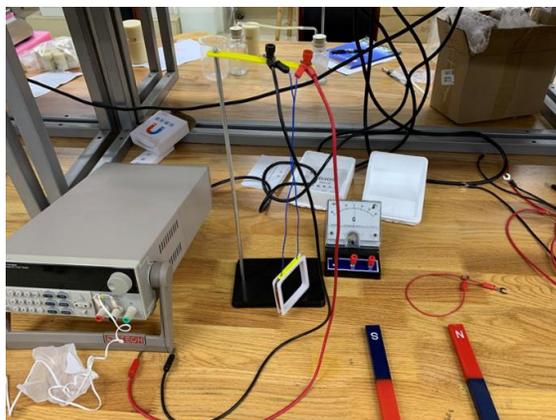
<https://www.bilibili.com/video/BV1f54y1Q7y3?from=search&seid=8686163143698228968>

### 33. 通电线圈和磁场

实验器材：线圈、电源、磁铁

实验说明：

左手定则用于已知电流方向和磁感线方向，判断通电导体在磁场中受力方向。伸开左手，让磁感线穿入手心（手心对准 N 极，手背对准 S 极），四指指向电流方向，那么大拇指的方向就是导体受力方向。



右手定则用于确定导体切割磁感线运动时在导体中产生的感应电流方向

的定则伸开右手，使大拇指跟其余四个手指垂直并且都跟手掌在一个平面内，把右手放入磁场中，让磁感线垂直穿入手心，大拇指指向导体运动方向，则其余四指指向感应电流的方向。

待研究问题:

- 1.利用磁场和导线圈，观察电流和受力现象。
- 2.利用这些器材，你还能设计哪些实验呢？