

# 大学物理实验



普通高等教育“十五”国家级规划教材



# 大学物理实验

李学慧 主编

高峰 孙炳全 杨桂娟 副主编



高等教育出版社  
HIGHER EDUCATION PRESS

## 出版信息

### 内容提要

本书是普通高等教育“十五”国家级规划教材,是在实验课程教学改革经验的基础上,根据教育部2004年制定的《非物理类理工科大学物理实验课程教学基本要求(讨论稿)》编写的。全书共分五章。第一章“绪论”部分介绍了物理实验课程的教学培养目标、教学安排及物理测量中应注意的原则和事项,还介绍了基本物理实验方法的分类及在物理测量中的应用。第二章介绍了测量不确定度的评定与表达方法。第三章、第四章、第五章按照“三段式”的课程教学体系,分别编入了基础性实验、提高性实验和研究性实验共58项,其中第五章还阐述了“课程论文的写作要求”。

本书具有如下特点:一是贴近课堂教学,为学生的学习服务,与物理实验课程的教学体系相配套;二是努力做到传授知识与培养能力相融合,科学教育与人文教育相融合;三是为了促进教学与科研相结合,在将教师的科研成果引入实验教学方面做了初步的尝试。

本书可作为高等院校理工科非物理类专业本科生教材,也可作为相关专业技术人员和其他有关人员的参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

大学物理实验 / 李学慧主编. —北京: 高等教育出版社, 2005.6 (2006 重印)

ISBN 7-04-016620-8

I. 大... II. 李... III. 物理学-实验-高等学校-教材 IV. O4-33

中国版本图书馆CIP数据核字(2005)第029803号

策划编辑 刘伟 责任编辑 奚静平 封面设计 于涛 责任绘图 朱静  
版式设计 王艳红 责任校对 王超 责任印制 朱学忠

---

出版发行	高等教育出版社	购书热线	010-58581118
社址	北京市西城区德外大街4号	免费咨询	800-810-0598
邮政编码	100011	网址	<a href="http://www.hep.edu.cn">http://www.hep.edu.cn</a>
总机	010-58581000		<a href="http://www.hep.com.cn">http://www.hep.com.cn</a>
经销	蓝色畅想图书发行有限公司	网上订购	<a href="http://www.landaco.com">http://www.landaco.com</a>
印刷	济南新华印刷厂		<a href="http://www.landaco.com.cn">http://www.landaco.com.cn</a>
		畅想教育	<a href="http://www.widedu.com">http://www.widedu.com</a>
开本	787×960 1/16	版次	2005年6月第1版
印张	26.25	印次	2006年1月第2次印刷
字数	490 000	定价	27.40元

---

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

物料号 16620-00

# 目录

## 目 录

<b>第一章 绪论</b> .....	1
一、物理实验课程的地位和作用 .....	1
二、物理实验课程的教学目标 .....	1
三、物理实验课程的教学安排 .....	2
四、物理实验课的注意事项 .....	3
五、基本物理实验方法简述 .....	6
<b>第二章 物理实验数据的处理方法</b> .....	11
一、学习物理实验数据处理方法的意义 .....	11
二、测量的基本术语及其解释 .....	11
三、直接测量的数据处理 .....	15
四、间接测量的数据处理 .....	19
五、双变量测量的数据处理 .....	23
六、有效数字及其运算 .....	28
附录1 实验室常用仪器的最大允许误差 .....	30
附录2 袖珍计算器的使用 .....	33
<b>第三章 基础性实验</b> .....	38
实验一 长度的测量 .....	38
实验二 密度的测量 .....	45
实验三 惠斯通电桥测电阻 .....	52
实验四 转动惯量的测量 .....	58
实验五 铜电阻和热敏电阻的温度特性 .....	64
实验六 冲击法测量磁场 .....	68
实验七 霍尔效应法测量磁感应强度 .....	76
实验八 牛顿环实验 .....	82
实验九 用分光计测光学玻璃折射率 .....	88
实验十 用单摆测重力加速度 .....	96
实验十一 用复摆测重力加速度 .....	100
实验十二 液体粘度的测量 .....	107
实验十三 液体表面张力系数的测量 .....	114
实验十四 牛顿第二定律的研究 .....	123
实验十五 简谐振动的研究 .....	131

## II 目录

实验十六 电势差计的使用 .....	136
实验十七 透镜焦距的测量 .....	141
实验十八 电表的改装 .....	147
实验十九 电子示波器的使用 .....	153
附录 .....	164
实验二十 用分光计测光栅参数 .....	167
实验二十一 固体比热容的测量 .....	176
实验二十二 拉伸法测金属杨氏模量 .....	178
<b>第四章 提高性实验 .....</b>	<b>187</b>
实验二十三 动力学共振法测金属杨氏模量 .....	187
实验二十四 热电偶的定标与测温 .....	196
实验二十五 电子束磁聚焦及电子荷质比的测量 .....	200
实验二十六 动态磁滞回线的测量 .....	205
实验二十七 RCL 串联电路暂态过程的研究 .....	211
实验二十八 RCL 串联电路稳态特性的研究 .....	218
实验二十九 声速的测量 .....	224
实验三十 用光电效应测普朗克常量 .....	229
实验三十一 偏振光的研究 .....	235
实验三十二 迈克耳孙干涉仪的调节和使用 .....	241
实验三十三 单缝衍射 .....	247
实验三十四 硅光电池线性响应的测量 .....	253
实验三十五 全息照相 .....	258
实验三十六 铁磁材料居里点的测量 .....	267
实验三十七 电介质介电常数的测量 .....	272
实验三十八 用电测法测定水的汽化热 .....	279
实验三十九 用模拟法测绘静电场 .....	281
实验四十 伏安法测电阻及电表的选择 .....	287
实验四十一 用多功能光谱仪研究氢原子光谱 .....	293
实验四十二 交流电桥 .....	299
实验四十三 亥姆霍兹线圈的磁场测量 .....	305
实验四十四 密立根油滴法测电子电荷 .....	310
实验四十五 固体导热系数的测量 .....	317
附录 1 .....	323
附录 2 .....	324
实验四十六 直流控制电路输出特性的研究 .....	325
<b>第五章 研究性实验 .....</b>	<b>334</b>
预备知识 .....	334
一、研究性实验阶段的教学安排 .....	334

---

二、物理实验课程论文的写作要求 .....	336
实验四十七 电饭锅温度控制电路的设计与组装 .....	341
实验四十八 万用表电路的设计与组装 .....	350
实验四十九 模拟电子秤 .....	358
实验五十 电冰箱制冷系数的测量 .....	362
实验五十一 热敏电阻温度计的设计安装和使用 .....	365
实验五十二 磁性液体表观密度的实验研究 .....	372
实验五十三 磁性液体密封容器泄放压的实验研究 .....	375
实验五十四 超声波探伤 .....	376
实验五十五 声光效应 .....	383
实验五十六 高温超导材料的基本特性 .....	388
实验五十七 数字信号光纤传输技术 .....	393
实验五十八 黑箱实验 .....	402

## 精选内容

### 第二章 物理实验数据的处理方法

#### 一、学习物理实验数据处理方法的意义

#### 二、测量基本术语及其解释

## 第二章 物理实验数据的处理方法

### 一、学习物理实验数据处理方法的意义

物理实验的教学目标之一是培养实践能力和创新能力.这一目标是通过完成一定数量的实验题目来实现的.做物理实验就离不开测量.在科学研究、工程技术、商贸结算、医疗卫生以及日常生活等各个领域都离不开测量.测量的目的是为了获得测量结果,在一些重要的测量中,还要求对测量结果的质量(可信程度)给出定量的说明,因为测量结果的质量往往会影响国家和企业的经济利益.如出口货物时,对货物的称重,希望既不要多,也不要少.多了,会使货物白白流失,少了,可能会遭遇索赔;又如对卫星质量或火箭燃料质量的测量,若测量不准,就有可能导致卫星发射的失败;再如使用放射线治疗疾病,对放射线剂量的测量必须准确,剂量少了,达不到治疗疾病的目的而延误治疗,剂量多了,会对人体造成伤害.但是,在实际工作中测量误差是不可避免的,任一测量结果都必然带有误差.不同的应用场合,对误差的限值有不同的要求.因此,在报告测量结果时,应该对这一测量结果可能包含的误差范围给出定量的说明,这就是测量结果及不确定度.在物理实验教学中,通过实验操作得到测量数据,通过数据处理得到测量结果及不确定度.由此看来,处理实验数据的能力,是科技人员及管理人员必备的实践能力之一,在校学生学习一点物理实验数据处理的知识是十分必要的.

### 二、测量的基本术语及其解释

#### 1. 测量

为获得被测物理量的量值而实施的一组操作,称为测量.这个定义中所说的“一组操作”,是实验的全过程,既包括实验操作,也包括数据处理,直到给出测量结果.

#### 2. 测量结果

由测量所得到的赋予被测物理量的值,称为测量结果.这里的“赋予”二字,指明了测量结果不是“真值”,而只是真值的一个估计.对于直接测量来说,如果

只做了单次测量,则观测值可作为测量结果;如果对同一物理量做了多次重复性测量,得到多个观测值,它们的算术平均值才是测量结果.

### 3. 实验标准差

实验标准差是表征测量结果分散性的量.

对同一物理量重复测量  $n$  次,得到一系列数据  $x_1, x_2, \dots, x_n$ , 这一列数据也叫测量列. 由于随机效应的影响,这些测量值各不相同,当  $n \rightarrow \infty$  时,这个测量列的算术平均值

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

称为总体均值.

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2}{n}}$$

称为总体标准差. 在实际工作中,  $n \rightarrow \infty$  是做不到的,因此  $\mu$  和  $\sigma$  只是理论上存在,所以有时  $\mu$  称为理论均值,  $\sigma$  称为理论标准差. 在实验操作时,  $n$  只能取有限值. 当  $n$  有限时,  $x_i$  的算术平均值

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

称为样本均值,可作为  $\mu$  的最佳估计值. 而理论标准差  $\sigma$  的估计值由贝塞尔<sup>①</sup>公式给出

$$S(x_i) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}$$

称为测量值的实验标准差,有时也称样本标准差. “样本”二字是指在无限多个测量值中取有限个测量值. 实验标准差  $S(x_i)$  就是表示测量结果分散性的量.  $S(x_i)$  越大表明测量结果的分散性越大,  $S(x_i)$  越小表明测量结果的分散性越小. 当取样较少,即  $n$  较小时,  $S(x_i)$  的值不稳定,当  $n$  增大时,  $S(x_i)$  值趋于一个稳定的值.

### 4. 测量不确定度

测量不确定度按字面可理解为对测量结果正确性的可疑程度,也可理解为表征被测量真值所处范围的一个参数. 前者只是定性的说明而难以定量的表述,

<sup>①</sup> 贝塞尔(1784—1846) 德国数学家、测量学家、天文学家. 他在数学上研究了贝塞尔函数. 他在天文学上的研究得到了贝塞尔星数,用以计算岁差、章动、光行差、视差,他还研究了贝塞尔根数来推断地球表面上任何地点的日食情况. 他在大地测量中研究了地球形状,得到了地球的长半径、短半径和扁率. 他还研究了仪器误差理论,建立了计算标准差的贝塞尔公式.

后者因涉及真值这一概念而缺乏可操作性。对测量不确定度最新的定义是：“表征合理地赋予被测量之值的分散性，与测量结果相联系的参数。”分散性的含义为一个量值区间，测量结果在这个区间出现，而不是一个确定的值。

测量不确定度来源于多个因素，因而它由多个分量组成。其中一些分量可用测量列的统计分布计算，称为 A 类评定，用实验标准差表征，记为  $u_A$ 。另一些分量用不同于统计分布的方法计算，称为 B 类评定，也用标准差来表征，记为  $u_B$ 。

#### 5. 合成标准不确定度

在间接测量的情况下，测量结果  $y$  是其他直接测得量  $x_i$  的函数

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$$

当各  $x_i$  彼此不相关时，按这些量的方差  $u_i^2$  算得不确定度，称为合成标准不确定度，以  $u_c$  表示

$$u_c = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x_1}\right)^2 u_1^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial x_2}\right)^2 u_2^2 + \dots + \left(\frac{\partial f}{\partial x_n}\right)^2 u_n^2}$$

式中  $u_i$  是  $x_i$  的标准不确定度， $\frac{\partial f}{\partial x_n}$  是  $u_i$  的传播系数。

#### 6. 扩展不确定度

扩展不确定度是确定测量结果区间的量，在这个区间内，包含了合理赋予被测量量值的大部分。假如测量结果为  $\bar{x}$ ，扩展不确定度为  $U$ ，则这个区间是指  $(\bar{x} - U, \bar{x} + U)$ 。扩展不确定度  $U$  与合成标准不确定度  $u_c$  的区别在于： $U$  所确定的区间比  $u_c$  所确定的区间有更大的置信概率来包含被测量之值，因而在量值上前者比后者大。为了求得扩展不确定度  $U$ ，需对合成标准度  $u_c$  乘以包含因子  $k$ ，既  $U = k u_c$ ，通常取  $k = 2$ 。在某些特殊应用场合也可取  $k = 1$  或  $k = 3$ ，本教材不涉及这些场合。

#### 7. 测量误差

测量结果减去被测量的真值称为测量误差。

对于单次测量，测量值就是测量结果；对于重复性测量，算术平均值就是测量结果。若以  $\bar{x}$  表示测量结果，以  $x_0$  表示真值，则测量误差为

$$\Delta x = \bar{x} - x_0 \quad (1)$$

误差与不确定度是两个完全不同的概念，不应混淆和误用。在数轴上，误差是一个点，可正可负，而不确定度是一个区间，不能带负号。误差大小不以人的认识程度而改变，但无法准确得到。不确定度的大小与人的认识程度有关，可以通过适当的评定和计算得到。不同的测量结果，其误差必定不同，但不确定度可以相同。同理，测量结果相同，其测量误差必定相同，但测量不确定度可以不相同。测量误差按其产生的原因和性质可分为随机误差和系统误差。

#### 8. 随机误差

由随机效应导致的误差称为随机误差. 对同一物理量进行重复性测量得到  $n$  个测量值, 这些测量值的误差时大时小, 时正时负而不可预知. 这些不可预知的变化称为随机效应. 正是随机效应导致了重复测量中的分散性. 随机误差的量值等于测量结果减去总体均值. 若以  $\bar{x}$  表示测量结果,  $\mu$  表示测量列的总体均值, 则随机误差可表示为

$$\varepsilon = \bar{x} - \mu \quad (2)$$

上式中  $\mu$  值不能准确得到, 故随机误差的量值也不能准确得到.

当测量次数充分多时, 各测得值的随机误差分布服从统计规律, 随机误差的主要特性可归纳为有界性和对称性.

有界性是指测量误差的绝对值不会超过一定的界限, 即不会出现绝对值过大的误差. 对称性是指绝对值相等而符号相反的误差出现的次数大致相等, 即测量值是以它们的算术平均值为中心而对称分布的, 这样, 所有误差的代数和趋近于零, 所以随机误差又具有抵偿性.

当误差分布呈现正态分布, 三角分布和梯形分布时, 随机误差还具有单峰性, 如图 1.

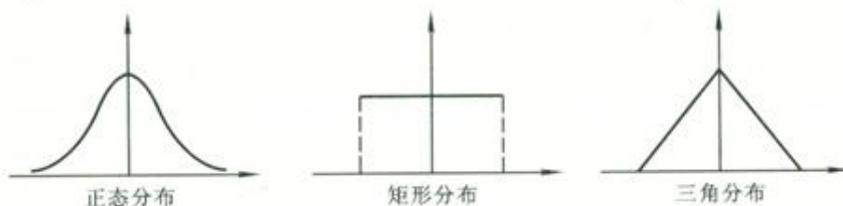


图 1 随机误差的单峰性

### 9. 系统误差

由系统效应导致的误差称为系统误差. 这里所说的系统效应主要来源于: 测量方法不理想、对环境条件的测量和控制不完善、测量仪器性能的不完善等等. 在物理实验教学中, 由测量仪器性能不完善而引起的误差, 常常成为我们重点考虑的误差来源.

系统误差的量值等于总体均值减去被测量的真值. 若以  $\mu$  表示总体均值,  $x_0$  表示真值, 则系统误差为

$$\delta = \mu - x_0 \quad (3)$$

由于  $\mu$  与  $x_0$  都是理想的概念, 故系统误差也是无法准确得到的.

由式(1)、(2)、(3)可得

$$\Delta x = \varepsilon + \delta \quad (4)$$

式(4)告诉我们, 测量误差等于随机误差与系统误差的代数和. 由于随机误差和系统误差都是无法准确得到的, 所以用式(4)不能将误差计算出来. 但它清楚地

### 三、直接测量的数据处理

说明了这样一个事实:测量误差是由随机效应和系统效应共同影响的结果.所以在分析不确定度来源时,即要考虑随机效应引起的不确定度,又要考虑由系统效应引起的不确定度.

#### 三、直接测量的数据处理

不必去测量与被测量有函数关系的其它量而能直接得到被测量值的方法叫直接测量.在物理实验教学中,直接测量数据处理的一般程序是

- (1) 以测量列  $x_1, x_2, \dots, x_n$  为样本.
- (2) 求出样本均值  $\bar{x}$  作为测量结果的最佳值.
- (3) 根据样本进行 A 类评定, 求出  $u_A$ .
- (4) 根据测量仪器的性能进行 B 类评定, 求出  $u_B$ .
- (5) 再求出标准不确定度  $u = \sqrt{u_A^2 + u_B^2}$
- (6) 最后求出扩展不确定度  $U = 2u$ , 写出结果表达式. 下面就来做一具体讨论.

##### 1. 测量结果的最佳估计值

对被测量进行直接测量时,通常是对被测量进行  $n$  次测量,得到一个测量列

$$x_1, x_2, \dots, x_n$$

它的样本均值

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (5)$$

就是测量结果的最佳值.

##### 2. A 类评定

在  $n$  个测量值中,任一测量值  $x_i$  的大小都具有随机性,即它分布在某一个区间内的任何一点都是可能的,由贝塞尔公式给出实验标准差

$$S(x_i) = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (6)$$

就表明了任一测量值  $x_i$  的分散性. 样本均值  $\bar{x}$  是通过随机取出的样本计算出来的,所以  $\bar{x}$  也有分散性,比如对同一被测量进行若干组重复测量,每一组都得到  $n$  个测量值,则每一组都能计算出一个平均值,这些平均值也是各不相同的,所以  $\bar{x}$  也有分散性. 只不过  $\bar{x}$  的分散性比  $S(x_i)$  更小. 平均值  $\bar{x}$  的分散性的大小用平均值的标准差

$$S(\bar{x}) = \frac{1}{\sqrt{n}} S(x_i) = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}} \quad (7)$$

来表征.

式(7)就是用统计分析方法评定出的关于  $\bar{x}$  的标准不确定度分量,称为 A 类标准不确定度,记为

$$u_A = S(\bar{x}) \quad (8)$$

$u_A$  的大小反映了测量结果  $\bar{x}$  由重复性引起的不确定度分量.

### 3. B 类评定

下面讨论由系统效应引起的不确定度分量的评定方法.在多数情况下,由系统效应引起的不确定度分量需采用不同于 A 类评定的其他方法来评定,称为 B 类评定.

在进行 B 类评定时,首要问题是要知道测量仪器的“最大允许误差”.所谓最大允许误差是指,对给定的测量仪器,其有关规范、规程允许的误差极限值,本教材中以  $\Delta_{\text{仪}}$  来表示.仪器的型号不同,其最大允许误差也不同.有些仪器可以通过查询国家计量检定规程而得到,如卡尺、千分尺、天平等.有些仪器可以在其铭牌和使用说明书中查到,如直流电桥、直流电位差计等.还有些仪器,在铭牌上给出了准确度等级,它可以换算成  $\Delta_{\text{仪}}$ .总之,在进行 B 类评定时,要通过查阅相关资料,以获得测量仪器的性能参数.见附录 1.

仪器的最大允许误差,是仪器示值相对被测量值之差的最大允许值,也可以理解为这个差值的分布不会超过  $(-\Delta_{\text{仪}}, +\Delta_{\text{仪}})$  这一区间,或者说在不考虑随机误差时被测量值以 100% 的置信概率包含在  $(\bar{x} - \Delta_{\text{仪}}, \bar{x} + \Delta_{\text{仪}})$  这一区间之内.因为  $u_B$  的置信概率小于  $\Delta_{\text{仪}}$  的置信概率,所以在量值上  $u_B < \Delta_{\text{仪}}$ ,本教材约定

$$u_B = \frac{1}{\sqrt{3}} \Delta_{\text{仪}} \quad (9)$$

### 4. 标准不确定度和扩展不确定度的计算

$u_A$  是由 A 类评定得到的标准不确定度分量,  $u_B$  是由 B 类评定得到的标准不确定分量,将  $u_A$  和  $u_B$  按方和根合成,得到  $\bar{x}$  的标准不确定度

$$u = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} \quad (10)$$

将式(8)、式(9)代入上式得

$$u = \sqrt{S^2(\bar{x}) + \frac{1}{3} \Delta_{\text{仪}}^2} \quad (11)$$

这样,  $\bar{x}$  的扩展不确定

$$U = 2 \sqrt{S^2(\bar{x}) + \frac{1}{3} \Delta_{\text{仪}}^2} \quad (12)$$

### 5. 测量结果表达式

对直接测量来说,测量结果为  $\bar{x}$ , 扩展不确定度为  $U$ , 则测量结果表达式为

$$x = \bar{x} \pm U; \quad k = 2 \quad (13)$$

下面对式(13)作几点说明

1) 式(13)说明,被测物理量的量值以较大概率落于 $(\bar{x} - U, \bar{x} + U)$ 区间之内.当 $k=2$ 时,这一概率可望达到90%以上(见参考文献4的 $P_{123}$ ).或者反过来说,被测量的量值落在上述区间之外的可能性较小,其概率不会超过10%.

2) 测量结果表达式应附有被测物理量的单位.

3) 关于 $\bar{x}$ 和 $S(\bar{x})$ 的计算,应借助带有统计运算功能的袖珍计算器,它可以使繁重的计算变得轻松和快捷.袖珍计算器的操作方法见附录2.

4) 关于有效数字取位的原则:扩展不确定度 $U$ 只取1位有效数字,第2位按4舍5入处理.平均值 $\bar{x}$ 的最末一位要与 $U$ 所在位对齐.当 $U$ 的首位数为1或2时,可取2位有效数字,相对扩展不确定度应取2位有效数字.

#### 6. 直接测量数据处理举例

例1 用 $\Delta_{\text{R}} = 0.02 \text{ mm}$ 的游标卡尺测某物长度,测量数据是  
29.18, 29.24, 29.28, 29.26, 29.22, 29.24 mm

求:

- (1) 样本均值 $\bar{x}$ .
- (2) 单次测量值的实验标准差 $S(x_i)$ .
- (3) 平均值 $\bar{x}$ 的标准差 $S(\bar{x})$ .
- (4) A类评定的不确定度分量 $u_A$ .
- (5) B类评定的不确定度分量 $u_B$ .
- (6) 扩展不确定度 $U$ .
- (7) 写出测量结果表达式.

解:

将测量值逐一输入计算器,经统计运算后,屏上分别显示出

$$\bar{x}: 29.236\ 666\ 67 \text{ mm}$$

$$S(x_i): 0.034\ 444\ 813\ 4 \text{ mm}$$

$$S(\bar{x}): 0.014\ 063\ 392 \text{ mm}$$

A类分量

$$u_A = S(\bar{x}) = 0.014\ 063\ 392 \text{ mm}$$

B类分量

$$u_B = \frac{1}{\sqrt{3}}\Delta_{\text{R}} = 0.011\ 547\ 005 \text{ mm}$$

扩展不确定度

$$U = 2 \times \sqrt{u_A^2 + u_B^2} = 0.036\ 392\ 984 \text{ mm}$$

下面对 $U$ 和 $\bar{x}$ 进行有效数字修约, $U$ 的首位数是3,可取一位有效数字,所以 $U=0.04$ , $\bar{x}$ 末位与 $U$ 所在位对齐,即 $\bar{x}$ 的末位应在百分位上,因为 $U$ 就是在

百分位上, 这样  $\bar{x} = 29.24$ . 结果表达式应写成  $x = (29.24 \pm 0.04) \text{ mm}; k = 2$

也可以写成  $x = 29.24(1 \pm 0.12\%) \text{ mm}; k = 2$

括号中的相对不确定度的计算数据应为  $\frac{0.036}{29.237} = 0.12\%$ , 不应取为  $\frac{0.04}{29.24} = 0.14\%$ , 以免因为数据修约给测量结果带来新的不确定度.

**例 2** 电压表制造厂说明书说明: 仪器校准后 1-2 年内, 在 1 V 内示值最大允许误差为  $14 \times 10^{-6} \times V_x + 2 \times 10^{-6} \times V_m$ , 设校准后 20 月在 1 V 内测量电压, 在重复性条件下测得电压的平均值  $\bar{V} = 0.928\ 571 \text{ V}$ , 平均值的标准差为  $S(\bar{V}) = 12 \mu\text{V}$ . 试计算出测量结果的扩展不确定度, 写出结果表达式.

**解:** 首先应根据说明书计算出仪器的最大允许误差  $\Delta_{\text{R}}$ , 说明书中的  $V_x$  是读数值, 即

$$V_x = 0.928\ 571 \text{ V}$$

说明书中的  $V_m$  是仪器的测量范围, 即

$$V_m = 1.000\ 000 \text{ V}$$

所以  $\Delta_{\text{R}} = 14 \times 10^{-6} \times 0.928\ 571 + 2 \times 10^{-6} \times 1.000\ 000 = 14.999\ 994 \approx 15 \mu\text{V}$

又知

$$S(\bar{V}) = 12 \mu\text{V}$$

这样

$$u_A = 12 \mu\text{V} \quad u_B = \frac{1}{\sqrt{3}} \Delta_{\text{R}} = 8.7 \mu\text{V}$$

标准不确定度是

$$u = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} = \sqrt{(12 \mu\text{V})^2 + (8.7 \mu\text{V})^2} = 15 \mu\text{V}$$

扩展不确定度是

$$U = 2 \times 15 \approx 0.000\ 03 \text{ V}$$

测量结果表达式为

$$V = (0.928\ 57 \pm 0.000\ 03) \text{ V}; \quad k = 2$$

还可以写成

$$V = 0.928\ 57(1 \pm 3.2 \times 10^{-5}) \text{ V}; \quad k = 2$$

值得注意的是, 测量结果  $\bar{V}$  原来读到小数点后第 6 位, 但因不确定度  $U$  在小数点后第 5 位, 为了使  $\bar{V}$  的末位与  $U$  的数位对齐, 而将  $\bar{V}$  的第 6 位舍去.

**例 3** 某一数字多用表, 最大允许误差为

$$\Delta_{\text{R}} = 0.005\% \times \text{读数} + 3 \times \text{最小步进值}$$

用此仪表测高值电阻共测量 10 次, 数据如下

$$999.31, 999.41, 999.59, 999.26, 999.54, 999.23, 999.14, \\ 999.06, 999.92, 999.62 \text{ (k}\Omega\text{)}$$

试写出测量结果表达式

**解:** 测量结果

## 四、 间接测量的数据处理

$$\bar{R} = \frac{1}{10} \sum_{i=1}^{10} R_i = 999.406 \text{ k}\Omega$$

实验标准差

$$S(R) = \sqrt{\frac{\sum (R_i - \bar{R})^2}{n-1}} = 0.261 \text{ k}\Omega$$

平均值的标准差

$$S(\bar{R}) = \frac{S(R)}{\sqrt{n}} = 0.082 \text{ k}\Omega$$

由随机效应(读数重复性)引入的不确定度分量按 A 类评定

$$u_A = S(\bar{R}) = 0.082 \text{ k}\Omega$$

由系统效应(仪表准确性)引入的不确定度分量按 B 类评定

$$u_B = \frac{1}{\sqrt{3}} \Delta_{\text{仪}} = \frac{1}{\sqrt{3}} (0.005\% \times 999.406 + 3 \times 0.01) = 0.046 \text{ k}\Omega$$

测量结果的标准不确定度为

$$u = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} = 0.094 \text{ k}\Omega$$

扩展不确定度为

$$U = 2u = 0.188 \approx 0.19 \text{ k}\Omega$$

因为  $U$  的首位数是 1, 所以取两位有效数字.

$$\text{相对扩展不确定度} \quad \frac{U}{R} = \frac{0.188}{999.406} = 0.019\%$$

结果表达式为

$$R = (999.406 \pm 0.019) \text{ k}\Omega; k = 2$$

也可以写成

$$R = 999.406(1 \pm 0.019\%) \text{ k}\Omega; k = 2$$

## 四、间接测量的数据处理

被测量  $y$  与其他量有函数关系, 测量结果由函数计算而得

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (14)$$

在这种情况下, 数据处理程序是

(1) 用直接测量的数据处理方法分别计算出  $\bar{x}_i$  和  $u_i$ . 即由式(5)计算出  $\bar{x}_i$ , 由式(11)计算出  $u_i$ .

(2) 计算出  $y$  的最佳估计值  $\bar{y}$ .

(3) 计算出  $y$  的合成标准不确定度  $u_c(y)$  及扩展不确定度  $U$ .

(4) 写出结果表达式.

下面分别讨论.

1. 间接测量的最佳值

首先用直接测量的数据处理方法计算出  $\bar{x}_i$  和  $u_i$ , 然后将各  $\bar{x}_i$  代入式(14)

中,得到

$$\bar{y} = f(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_n) \quad (15)$$

作为间接测得量  $y$  的最佳估计值. 由于  $\bar{x}_i$  具有不确定度, 所以由上式得到的  $\bar{y}$  也必然具有不确定度. 或者说, 由于  $\bar{x}_i$  具有分散性, 所以  $\bar{y}$  也具有分散性, 表征这一分散性的参量就是合成标准不确定度, 以  $u_c(\bar{y})$  表征.

## 2. 合成标准不确定度的评定

$\bar{y}$  的不确定度来源于所有  $\bar{x}_i$  的不确定度, 也就是  $\bar{y}$  的标准不确定度  $u_c(\bar{y})$  是由各直接测得量  $x_1, x_2, \dots, x_n$  的标准不确定度  $u_1, u_2, \dots, u_n$  适当合成而求得. 当全部直接测得量  $x_i$  彼此独立时,  $\bar{y}$  的合成标准不确定度由下式给出

$$u_c(\bar{y}) = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x_1}\right)^2 u_1^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial x_2}\right)^2 u_2^2 + \dots} \quad (16)$$

式(16)称为不确定度传播律. 式中  $\frac{\partial f}{\partial x_i}$  就是函数  $y = f(x_1, x_2, \dots)$  在  $x_i = \bar{x}_i$  时的

偏导数, 这些偏导数称为灵敏系数, 记为  $c_i$ , 即  $c_i = \left(\frac{\partial f}{\partial x_i}\right)$ , 它表示被测量估计值  $\bar{y}$  随直接测得值  $\bar{x}_i$  变化而变化的程度. 即当  $\bar{x}_i$  有微小变化  $\Delta x_i$  时,  $\bar{y}$  值相应变化为  $(\Delta y)_i = \frac{\partial f}{\partial x_i} \Delta x_i$ , 如果这个变化  $\Delta x_i$  来自  $\bar{x}_i$  的不确定度  $u_i$ , 则  $\bar{y}$  的相应变化就是

$$u_i(\bar{y}) = \frac{\partial f}{\partial x_i} u_i = c_i u_i$$

$u_i(\bar{y})$  是  $u_c(\bar{y})$  的一个分量, 它表示第  $i$  个直接测得值  $\bar{x}_i$  的不确定度  $u_i$  对  $\bar{y}$  的不确定度所做的贡献.

$\bar{y}$  的扩展不确定度为合成标准不确定度乘以包含因子  $k$ , 若取  $k=2$ , 则有

$$U(\bar{y}) = 2u_c(\bar{y}) \quad (17)$$

如果函数  $f$  的表现形式为

$$y = c x_1^{p_1} x_2^{p_2} \dots x_n^{p_n}$$

两边取自然对数

$$\ln y = \ln c + p_1 \ln x_1 + p_2 \ln x_2 + \dots$$

按不确定度传播律, 有

$$\frac{u_c(\bar{y})}{\bar{y}} = \sqrt{\left(p_1 \frac{u_1}{\bar{x}_1}\right)^2 + \left(p_2 \frac{u_2}{\bar{x}_2}\right)^2 + \dots} \quad (18)$$

如果指数  $p_i$  只是 +1 或 -1, 则上式成为

$$\frac{u_c(\bar{y})}{\bar{y}} = \sqrt{\left(\frac{u_1}{\bar{x}_1}\right)^2 + \left(\frac{u_2}{\bar{x}_2}\right)^2 + \dots} \quad (19)$$

式(19)说明, 当  $y$  是  $x_i$  的乘除运算结果时, 则  $\bar{y}$  的相对不确定度是各  $\bar{x}_i$  的相对

不确定度的方和根. 例如一长方体的体积  $V = lbh$ , 则  $V$  的相对合成标准不确定度为

$$\frac{u_c(\bar{V})}{V} = \sqrt{\left(\frac{u_l}{l}\right)^2 + \left(\frac{u_b}{b}\right)^2 + \left(\frac{u_h}{h}\right)^2}$$

### 3. 间接测量的结果表达式

由式(15)得到  $\bar{y}$ , 由式(17)得到  $U(\bar{y})$ , 则测量结果表达式为

$$y = \bar{y} \pm U(\bar{y}); \quad k = 2 \quad (20)$$

还可以写成

$$y = \bar{y} \left( 1 \pm \frac{U(\bar{y})}{\bar{y}} \times 100\% \right); \quad k = 2$$

下面对式(20)作几点说明

1) 式(20)表明被测量值以较大概率处在  $(\bar{y} - U, \bar{y} + U)$  区间之内. 当  $k = 2$ , 这个概率可望达到 90% 以上.

2) 扩展不确定度  $U$  只取一位有效数字, 当  $U$  的首位数是 1 或 2 时可取两位有效数字,  $\bar{y}$  的末位与  $U$  所在数位对齐. 相对扩展不确定度  $\frac{U}{\bar{y}} \times 100\%$  取两位有效数字. 若  $\bar{y}$  的位数还不够到达这一位, 则应加零补齐. 例如  $\bar{y}$  为 36.06 mm,  $U$  为 0.007 mm, 结果表达式应写成  $y = 36.060 \pm 0.007$  mm. 在  $U$  的连续运算中, 其不确定度分量或标准不确定度至少应多保留一位数, 以避免由于数字修约导致新的不确定度. 当然, 用计算器进行运算时, 则不会出现这样的问题.

### 4. 间接测量的数据处理举例

**例 1** 在 20 °C 条件下, 用一级千分尺测量某金属圆柱体的体积, 测量数据如下

$$d_i/\text{cm}: 1.0071, 1.0073, 1.0069, 1.0078, 1.0070, 1.0074$$

$$h_i/\text{cm}: 2.0105, 2.0110, 2.0108, 2.0112, 2.0104, 2.0100$$

体积计算公式为  $V = \frac{1}{4}\pi d^2 h$ , 试写出测量结果表达式.

**解:**

将  $d_i$  输入计算器, 经统计运算得到

$$\bar{d} = 1.00725 \text{ cm} \quad S(d_i) = 0.00033 \text{ cm}$$

将  $h_i$  输入计算器, 经运算得到

$$\bar{h} = 2.01065 \text{ cm} \quad S(h_i) = 0.00044 \text{ cm}$$

由测量重复性导致的不确定度分量

$$u_A(\bar{d}) = \frac{S(d_i)}{\sqrt{6}} = 0.00013 \text{ cm}$$

$$u_A(\bar{h}) = \frac{S(d_i)}{\sqrt{6}} = 0.000\ 17\ \text{cm}$$

由千分尺准确性导致的不确定度分量,可根据千分尺的最大允许误差求出,按 GB1216—75 规定,量程为 25 mm 的一级千分尺,其最大允许误差  $\Delta_{\text{允}} = 0.004\ \text{mm}$ .

$$\text{其标准不确定度为 } u_B(\bar{d}) = u_B(\bar{h}) = \frac{1}{\sqrt{3}} \Delta_{\text{允}} = 0.000\ 23\ \text{cm}$$

直径  $\bar{d}$  的标准不确定度为

$$u_d = \sqrt{u_A^2(\bar{d}) + u_B^2(\bar{d})} = \sqrt{0.000\ 13^2 + 0.000\ 23^2} = 0.000\ 26\ \text{cm}$$

高  $\bar{h}$  的标准不确定度为

$$u_h = \sqrt{u_A^2(\bar{h}) + u_B^2(\bar{h})} = \sqrt{0.000\ 17^2 + 0.000\ 23^2} = 0.000\ 29\ \text{cm}$$

体积的最佳估计值为

$$\begin{aligned} \bar{V} &= \frac{1}{4} \pi \bar{d}^2 \bar{h} = 0.25 \times 3.141\ 59 \times 1.007\ 25^2 \times 2.010\ 65 \\ &= 1.602\ 14\ \text{cm}^3 \end{aligned}$$

$\pi$  取到小数点后第 5 位,避免了因  $\pi$  的取位过少而产生新的不确定度.  $\bar{V}$  的相对合成标准不确定度为

$$\begin{aligned} \frac{u_c(\bar{V})}{\bar{V}} &= \sqrt{4 \left( \frac{u_d}{\bar{d}} \right)^2 + \left( \frac{u_h}{\bar{h}} \right)^2} = \sqrt{4 \times \left( \frac{0.000\ 26}{1.007\ 25} \right)^2 + \left( \frac{0.000\ 29}{2.010\ 65} \right)^2} \\ &= 0.000\ 536 = 0.053\ 6\% \end{aligned}$$

$\bar{V}$  的相对扩展不确定度为

$$E = \frac{U}{\bar{V}} = \frac{2u_c(\bar{V})}{\bar{V}} = 0.001\ 07 = 0.11\%$$

结果表达式为

$$V = 1.602\ 1(1 \pm 0.11\%) \text{ cm}^3; \quad k = 2$$

上式中  $\bar{V}$  取到小数点后第 4 位数,因为扩展不确定度的末位就在小数点后第 4 位上,即

$$U = E \cdot \bar{V} = 0.001\ 07 \times 1.6 \approx 0.001\ 7\ \text{cm}^3$$

结果表达式还可以写成

$$V = (1.602\ 1 \pm 0.001\ 7) \text{ cm}^3; \quad k = 2$$

**例 2** 间接测得量  $y$  与直接测得量  $x_1, x_2$  有如下函数关系,  $y = x_1 + x_2$ .

已知:  $x_1 = 400 \pm 4\ \text{mm}; \quad k = 2$      $x_2 = 32.1 \pm 0.2\ \text{mm}; \quad k = 2$

试写出  $y$  的测量结果表达式.

## 五、双变量测量的数据处理

解:

(1)  $y$  的最佳估计值

$$\bar{y} = \bar{x}_1 + \bar{x}_2 = 400 + 32.1 = 432.1$$

(2)  $\bar{y}$  的扩展不确定度

$$U = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x_1} U_1\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial x_2} U_2\right)^2} = \sqrt{4^2 + 0.2^2} \text{ mm} = 4 \text{ mm}$$

也可以先计算出合成标准不确定度

$$u_c(\bar{y}) = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x_1}\right)^2 u_1^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial x_2}\right)^2 u_2^2} = \sqrt{2^2 + 0.1^2} \text{ mm} = 2.0 \text{ mm}$$

式中的

$$u_1 = \frac{1}{2} U_1 = 2 \text{ mm}, u_2 = \frac{1}{2} U_2 = 0.1 \text{ mm}$$

再求出扩展不确定度

$$U = 2u_c(\bar{y}) = 4 \text{ mm}$$

可见,两种算法结果一致.

(3) 测量结果表达式

$$y = 432 \pm 4 \text{ mm}; k = 2$$

## 五、双变量测量的数据处理

直接测量和间接测量的待求量只有一个,而在实际工作中还经常需要在—组测量中同时求出多个变量,叫多变量测量,也称组合测量.当待求量有两个时叫双变量测量,例如电阻  $R$  是温度  $t$  的函数,当它们满足线性关系时,有  $R = R_0 + \alpha t$ ,若能求出  $R_0$  和  $\alpha$ ,则两个变量  $R, t$  之间的函数关系便确定了.一般地说,若两个变量  $x, y$  满足线性关系,为了求出它们的函数关系式  $y = a + bx$ ,只要求出  $a$  和  $b$  即可.通常做法是在  $x_i$  的一系列不同取值下,测得一系列  $y_i$  值,得到

$$\begin{cases} x_1, x_2, x_3, \dots, x_n \\ y_1, y_2, y_3, \dots, y_n \end{cases}$$

再根据这  $n$  对数据,按着一定的数据处理程序得到两个待求量  $a$  和  $b$ . 这个问题实际上是一元线性方程的回归问题.  $a$  称为回归常数,  $b$  称为回归系数,最常用的数据处理方法有作图法、逐差法和最小二乘法.

### 1. 作图法

作图法的特点是,将测量数据在坐标纸上逐一描点,根据观测点的分布趋势连成一条光滑的曲线.对于一元线性函数来说,该图线是一条直线.如图2所示,它是某电阻的温度特性图线,求  $a, b$  值的所有计算数据都取在图线上,图线是求解的基础,实验者应注意减少作图误差.首先,这条直线应通过观测值的中值点

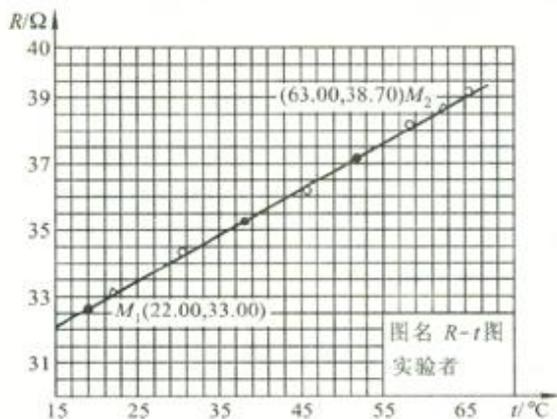


图2 作图法

$(\bar{x}, \bar{y})$ ; 其次, 大部分观测点应该在直线上, 其他观测点均匀分布在该直线的两侧. 中值点的坐标是  $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum x_i, \bar{y} = \frac{1}{n} \sum y_i$ . 画好图之后, 在图线上靠近两端取两个坐标点  $M_1(x_1, y_1), M_2(x_2, y_2)$ , 可算出回归系数

$$b = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \quad (21)$$

若横轴起点为零, 则直线与纵轴交点  $y_0$  即是回归常数

$$a = y_0 \quad (22)$$

若横轴起点不为零, 可用下式计算

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

$$\text{或} \quad a = y_2 - bx_2 = y_2 - \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} x_2 = \frac{x_2 y_1 - x_1 y_2}{x_2 - x_1} \quad (23)$$

作图的步骤是

1) 根据作图的要求, 选择坐标纸的尺寸, 测量数据的有效数字位数越多, 坐标纸的尺寸也应相应增大, 实验室推荐尺寸为  $7.5 \times 10 \text{ cm}^2$  (根据需要也可适当增大或减小). 在坐标纸上画坐标轴, 注明单位, 标出分度值, 坐标轴上的分度值应均匀标定, 且以 2, 5, 10 等的整倍数为好, 分度值的起点不一定是零.

2) 根据观测数据计算出  $\bar{x}, \bar{y}$ .

3) 根据观测数据, 在坐标纸上逐一描点, 数据点的符号可为 +、×、○ 等, 任选其一.

4) 根据数据点的分布趋势, 连结成一条直线. 不要画成折线.

5) 在图线上选择两个坐标点作为“取用点”, 根据这两个取用点给出的数据进行回归计算. 取用点的横坐标应取成整数, 二者距离应尽可能大一些, 取用点的符号应与观测点的符号有所区别.

6) 在图纸的适当部位写上图注, 内容包括图名, 作者, 实验日期等, 最后将图纸粘贴在实验报告纸的适当部位。

### 2. 逐差法

为了避免作图法的随意性, 希望对双变量测量所获得的数据规定一个计算程序, 以期获得较一致的实验结果。在  $n$  对数据  $x_1, x_2, \dots, x_n; y_1, y_2, \dots, y_n$  中任取两对数据都能利用公式  $b = \frac{\Delta y}{\Delta x}$  求出  $b$  值, 选用数据的原则是:

- 1) 所有的数据都要用上;
- 2) 任一数据都不要重复使用。

逐差法规定, 把  $n$  对数据分成两组, 用第二组的一对数据作被减数, 用第一组相应的一对数据作减数。例如共 10 对数据, 就将第 1—5 对数据分为第一组, 将第 6—10 对数据分为第二组, 然后第 6 对与第 1 对相减, 第 7 对与第 2 对相减, …… 就是  $b_1 = \frac{y_6 - y_1}{x_6 - x_1}, b_2 = \frac{y_7 - y_2}{x_7 - x_2}, \dots$  逐 5 相减直到  $b_5 = \frac{y_{10} - y_5}{x_{10} - x_5}$ , 共得到 5 个  $b_i (i=1, 2, 3, 4, 5)$ , 最佳值是它们的平均值

$$b = \frac{1}{\frac{n}{2}} \sum_{i=1}^{\frac{n}{2}} b_i = \frac{2}{n} \sum b_i \quad (24)$$

回归常数为

$$a = \bar{y} - b\bar{x} \quad (25)$$

### 3. 最小二乘法

根据最小二乘法原理进行回归运算的方法称为最小二乘法。用这种方法不仅能准确求出  $a$  和  $b$ , 而且能估算出它们的不确定度, 还能检验出这两个变量之间线性关系的符合程度。由于不少袖珍计算器已具备了回归运算的功能, 近年来最小二乘法得到了迅速的普及。

#### (1) 最小二乘法原理

最小二乘法原理可表述为: 一个测量列的最佳值, 应使它与测量列中所有测量值的残差的平方和为最小。即测量列  $x_1, x_2, \dots, x_n$  的最佳值如果是  $A$ , 则第  $i$  个测量值  $x_i$  的残差是  $v_i = x_i - A$ , 残差的平方和为最小, 可以写成

$$\sum (x_i - A)^2 = \min \quad (26)$$

若  $A$  满足上式, 则  $A$  必是测量列的最佳估计值, 即  $A = \bar{x}$ 。实际上由式(26)对  $A$  求偏导就可以得到  $A = \frac{1}{n} \sum x_i = \bar{x}$ , 间接验证了最小二乘法原理的正确性。

#### (2) 回归运算

若  $n$  对数据  $x_1, x_2, \dots, x_n; y_1, y_2, \dots, y_n$  满足线性关系, 且没有测量误差, 则可写成

$$\begin{cases} y_1 - a - bx_1 = 0 \\ y_2 - a - bx_2 = 0 \\ \dots\dots \\ y_n - a - bx_n = 0 \end{cases}$$

然而没有测量误差的假设不能成立,但可以假设  $x_i$  数列的误差远小于  $y_i$  数列的误差,因而  $x_i$  数列的误差可以忽略,而  $y_i$  数列的误差为  $v_i$ ,则以上方程组应改写成

$$\begin{cases} y_1 - a - bx_1 = v_1 \\ y_2 - a - bx_2 = v_2 \\ \dots\dots \\ y_n - a - bx_n = v_n \end{cases}$$

称为误差方程组. 根据最小二乘原理,若  $a, b$  是最佳值,则有  $\sum v_i^2 = \min$

$$\text{写成} \quad \sum (y_i - a - bx_i)^2 = \min \quad (27)$$

$$a \text{ 满足式(28)的条件是} \quad \frac{\partial}{\partial a} \sum (y_i - a - bx_i)^2 = 0$$

$$b \text{ 满足式(28)的条件是} \quad \frac{\partial}{\partial b} \sum (y_i - a - bx_i)^2 = 0$$

对以上两式分别求偏导数,整理后得到

$$\begin{cases} \sum y_i - na - b \sum x_i = 0 \\ \sum x_i y_i - a \sum x_i - b \sum x_i^2 = 0 \end{cases}$$

将

$\sum x_i = n \bar{x}$ ,  $\sum y_i = n \bar{y}$ ,  $\sum x_i y_i = n \overline{xy}$ ,  $\sum x_i^2 = n \overline{x^2}$  代入上式,得

$$\begin{cases} \bar{y} - a - b \bar{x} = 0 \\ \overline{xy} - a \bar{x} - b \overline{x^2} = 0 \end{cases}$$

解上述联立方程,得

$$b = \frac{\overline{xy} - \bar{x} \cdot \bar{y}}{\overline{x^2} - \bar{x}^2}, \quad a = \bar{y} - b \bar{x} \quad (28)$$

还应指出的是,用这种方法求常数项  $a$ 、一次项系数  $b$  的前提条件是假设  $x, y$  两个变量线性相关,但有时并没有太大的把握判断它们一定线性相关. 在这种情况下,还要根据相关系数

$$r = \frac{\overline{xy} - \bar{x} \cdot \bar{y}}{\sqrt{(\overline{x^2} - \bar{x}^2)(\overline{y^2} - \bar{y}^2)}} \quad (29)$$

的大小来判断是否满足线性关系. 可以证明,当  $r$  接近 1 时,  $x$  与  $y$  两个变量线性相关,当  $r$  接近 0 时,两个变量彼此独立. 在用最小二乘法进行回归运算时,应借助带有回归运算功能的袖珍计算器,只要把相关测量数据  $x_i$  和  $y_i$  输入计算

器,显示屏上能立即显示出  $a$ 、 $b$  和  $r$  的量值.

#### 4. 双变量测量的数据处理举例

**例 1** 用牛顿环装置测平凸透镜的曲率半径的公式是

$$D_k^2 = 4k\lambda R$$

式中,  $\lambda = 589.3 \text{ nm}$ , 是钠光波长;  $k$  是干涉圆环级次;  $D_k$  是第  $k$  级干涉圆环的直径.

测得的数据如下表:

级次 $k$	6.0	7.0	8.0	9.0	10.0	11.0	12.0	13.0	14.0	15.0
$D_k$	4.568	4.890	5.187	5.464	5.743	6.012	6.234	6.488	6.717	6.942

试用逐差法求透镜的曲率半径  $R$ .

**解:** 因为  $D_k^2$  与  $k$  满足线性关系, 所以  $D_k^2$  对  $k$  的变化率  $b = \frac{\Delta D_k^2}{\Delta k}$ , 为了用逐差

法求  $b$ , 首先列出  $D_k^2 \sim k$  的数据表:

级次 $k$	6.0	7.0	8.0	9.0	10.0	11.0	12.0	13.0	14.0	15.0
$D_k^2/\text{mm}^2$	20.867	23.902	26.905	29.855	32.982	36.144	38.863	42.094	45.118	49.191

将  $k = 6.0 \sim 10.0$  分为第一组,  $k = 11.0 \sim 15.0$  分为第二组, 逐 5 相减, 则

$$b_1 = \frac{36.144 - 20.867}{11.0 - 6.0} = 3.06; \quad b_2 = \frac{38.863 - 23.902}{12.0 - 7.0} = 3.00;$$

$$b_3 = \frac{42.094 - 26.905}{13.0 - 8.0} = 3.04; \quad b_4 = \frac{45.118 - 29.855}{14.0 - 9.0} = 3.05;$$

$$b_5 = \frac{48.191 - 32.982}{15.0 - 10.0} = 3.04$$

最佳值 
$$b = \frac{1}{5} \sum b_i = 3.04 \text{ mm}^2$$

由  $b = 4\lambda R$  得

$$R = \frac{b}{4\lambda} = \frac{3.04}{4 \times 589.3 \times 10^{-6}} \text{ mm} = 1.28 \times 10^3 \text{ mm}$$

**例 2** 对  $x, y$  进行双变量测量, 得 8 对数据如下

$$x: 1.00, 3.00, 8.00, 10.00, 13.00, 15.00, 17.00, 20.00$$

$$y: 3.0, 43.0, 6.0, 7.0, 8.0, 9.0, 10.0, 11.0$$

试用最小二乘法求出线性方程.

**解法一**

若手头没有带回归运算功能的计数器, 可以用这个方法.

## 六、有效数字及其运算

首先使用计算器进行统计运算,得到

$$\begin{aligned}\bar{x} &= 10.9, \bar{x}^2 = 118.8, \overline{x^2} = 157.1, \bar{y} = 7.25 \\ \bar{y}^2 &= 52.6, \overline{y^2} = 59.5, \bar{x} \cdot \bar{y} = 78.9, \overline{xy} = 95.2\end{aligned}$$

将以上数据代入式(30),得

$$\begin{aligned}\text{相关系数 } r &= \frac{\overline{xy} - \bar{x} \cdot \bar{y}}{\sqrt{(\overline{x^2} - \bar{x}^2)(\overline{y^2} - \bar{y}^2)}} = \frac{95.2 - 78.9}{\sqrt{(157 - 118)(59.5 - 52.6)}} \\ &= 0.9962\end{aligned}$$

因为  $r$  接近 1, 可以断定  $x$  与  $y$  线性相关

由式(29)得

$$\text{回归系数 } b = \frac{\overline{xy} - \bar{x} \cdot \bar{y}}{\overline{x^2} - \bar{x}^2} = \frac{95.2 - 78.9}{157.1 - 118.8} = 0.426$$

$$\text{回归常数 } a = \bar{y} - b\bar{x} = 7.25 - 0.420 \times 10.9 = 2.61$$

$$\text{所以回归方程是 } y = 2.61 + 0.426x$$

### 解法二

用带有回归运算功能的计算器进行回归计算,将  $x_i, y_i$  按一定程序分别输入计算器后,计算器能够将  $r, a, b$  的量值直接显示出来(见附录 2).

## 六、有效数字及其运算

用测量结果表达式来报道测量结果,既给出了最佳值,又给出了不确定度,能使人们对被测量值所处的范围有一个比较清楚地认识.有些场合,对被测量值不要求计算不确定度,这时,通过测量结果的有效数字位数也能大致判断不确定度的量级.一般来说,有效数字的尾数是有误差的,误差项只取一位,最多不能超过两位.本教材约定,今后在进行有效数字运算时,所有参与运算的有效数字,其最末一位具有误差,运算结果也要取到有误差那一位为止.至于如何确定误差在哪一位,理论上应按不确定度的传播律来计算.在实际运算中为了简便与快捷,可根据有效数字运算规则来取位,或合理采用某些技巧来取位,所得结果与理论上的结果都比较接近.

在物理实验教学中,经常会遇到读数取几位数和运算结果取几位数的问题,下面就这两个问题作简要介绍.

### 1. 测读数据的取位

(1) 实验仪器或仪表给出仪器的最大允许误差  $\Delta_{\text{限}}$  时,应读到仪器误差所在的那一位.

(2) 测量仪器的读数装置带有标尺时,应在标尺的两刻线间估读一位数,因

为仪器的误差往往是分度值的十分之几.如图3所示,该直尺的分度值是1 mm,而该直尺的允许误差是0.1 mm,误差在十分位上,因此读数的末位也应在十分位上,读成84.4 mm,末位数4是有误差的.

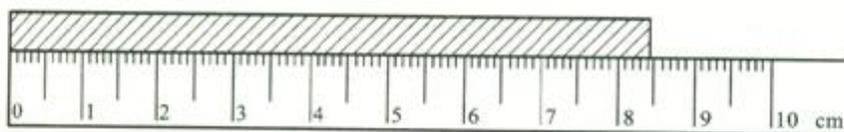


图3 读数的取位

## 2. 运算结果的取位

### (1) 加减运算

运算结果的末位数的数位应与参与运算的各分量中末位数的数位最高者相同.例如  $y = A + B - C + D$ , 式中  $A = 71.3$ ,  $B = 6.262$ ,  $C = 0.753$ ,  $D = 271$ , 求  $y = ?$  参与运算的各分量  $A, B, C, D$  中, 其末位数都是有误差的, 而末位数的数位最高者为  $D$ , 它的误差不会小于  $\pm 1$ , 而运算结果  $y$  的误差也不会小于  $\pm 1$ , 可以认为  $y$  与  $D$  的末位数应在同一数位上, 所以运算结果  $y$  的末位数应与  $D$  相同, 故  $y = 347.809 \approx 348$ , 表明  $y$  的个位数是有误差的, 小数点后的数字按4舍5入处理.

### (2) 乘除运算

运算结果的有效数字位数与参与运算的各分量中有效数字位数最少者相同.

例如  $y = A \cdot B / C$ , 其中  $A = 1\ 000$ ,  $B = 100$ ,  $C = 20$ , 求  $y = ?$  参与运算的各分量  $A, B, C$  中, 有效数字最少者是  $C$ , 有两位有效数字,  $y$  的有效数字位数也不会高于  $C$ , 可以认为  $y$  与  $C$  有相同的有效数字位数. 即  $y = 1\ 000 \times 100 / 20 = 5.0 \times 10^3$ , 当运算结果的首位数是1和2时, 则应再多取1位数.

### (3) 对数运算

对数的有效数字其小数点后的位数与真数的位数相同.

例如  $y = \ln x$ , 式中  $x = 888$ , 经计算器运算得  $\ln 888 = 6.788\ 971$ . 因为真数  $x$  是三位有效数字, 所以  $y$  的小数点后取3位, 即  $\ln 888 = 6.789$ .

### (4) 指数运算

今有  $y = e^x$ , 运算结果  $y$  应按科学计数法表达, 其小数点前取1位数, 小数点后的位数与  $x$  小数点后的位数相同. 上式中  $x = 9.14$ , 计算器给出  $e^{9.14} = 9\ 320.765\ 1 = 9.320\ 765\ 1 \times 10^3$ . 再取到小数点后的第2位, 则  $y = 9.32 \times 10^3$ .

### (5) 三角函数运算

今有  $y = \sin x$ , 若  $x$  的末位是度, 则  $y$  取2位数, 若  $x$  的末位为分, 则  $y$  取4位数. 例如

$$\sin 30^\circ = 0.50$$

## 附录1 实验室常用仪器的最大允许误差

$$\sin 30^{\circ}0' = 0.5000$$

以上阐述的有效数字的运算和取位规则,其合理性是不难证明的.只需用不确定度的传播律,根据参与运算各分量的不确定的量值,就能比较容易地估算出  $y$  的不确定的数量级.进而确定  $y$  的末位是在哪一位.

对于各种函数运算,如指数运算、对数运算、三角函数运算、乘方运算、根式运算等等,不必死记上述规则.如果手头有一台计算器,只要在  $x$  的末位  $+1$  (或  $-1$ ),比较两个运算结果最先出现差异的那一位,便应是  $y$  的末位.其实  $y$  的这个差异是由  $x$  的差异导致的.例如  $\ln 888 = 6.788971$ ,  $\ln 887 = 6.787845$ ,由于  $x$  末位的差异,使得  $y$  在小数点后第3位产生差异,所以应取为  $y = 6.789$ .

又如  $\sin 30^{\circ} = 0.5000$ ,  $\sin 31^{\circ} = 0.5150$ ,所以  $\sin 30^{\circ} = 0.50$ .

### 附录1 实验室常用仪器的最大允许误差

测量仪器的最大允许误差是“有关规范、规程允许的误差极限值.”它是 B 类评定的最重要的信息.下面给出实验室常用仪器的最大允许误差.

#### 1. 钢直尺和钢卷尺

常用钢直尺的分度值为 1 mm,有的在始端或末端 50 mm 内加有 0.5 mm 的刻度线.常用钢卷尺分为大、小两类,小钢卷尺的长度有 1 m 和 2 m 两种,分度值都是 1 mm.钢直尺和钢卷尺的最大允许误差见表 1.

表 1 钢直尺和钢卷尺的最大允许误差

	规格 (mm)	允许误差 (mm)
钢直尺	至 300	$\pm 0.1$
	300 ~ 500	$\pm 0.15$
	500 ~ 1 000	$\pm 0.2$
钢卷尺	1 000	$\pm 0.5$
	2 000	$\pm 1$

#### 2. 游标卡尺

游标卡尺的分度值有 0.02、0.05 和 0.1 mm 三种,游标卡尺的最大允许误差就是该游标卡尺的分度值.即  $\Delta_{\text{B}} = \text{分度值}$ .

#### 3. 千分尺

千分尺按其精度分为零级和一级两类.实验室通常使用的是一级千分尺,最

大允许误差见表2.

表2 一级千分尺的最大允许误差 单位: mm

测量范围	-100	100~500	150~200
允许误差	$\pm 0.004$	$\pm 0.005$	$\pm 0.006$

#### 4. 天平

按结构原理,天平可分为机械天平和电子天平两种.机械天平按准确度又可分为I、II、III、IV四个等级,它们分别表示特别准确度、高准确度、中准确度、普通准确度.实验室常用的是高准确度天平.高准确度天平中,又进一步细分为8级、9级和10级.对于机械天平,国家标准没有给出统一的最大允许误差值,根据测量实践,在设法消除不等臂误差的测量条件下,可以粗略地认为,天平的分度值可作为它的最大允许误差,即 $\Delta_{\text{允}} = \text{分度值}$ .

对于电子天平,国家标准给出了在不同载荷下的最大允许误差值,见表3.

表3 II级电子天平的最大允许误差(以分度 $e$ 表示)

载荷	$0 < m \leq 5 \times 10^3$	$5 \times 10^3 < m \leq 2 \times 10^4$	$2 \times 10^4 < m \leq 1 \times 10^5$
最大允许误差	$\pm 1$	$\pm 2$	$\pm 3$

#### 5. 机械秒表和电子秒表

机械秒表的最大允许误差可以认为就是它的分度值.

$$\Delta_{\text{允}} = \text{分度值}$$

电子秒表的最大允许误差 $\Delta_{\text{允}} = (0.01 + 0.000\ 005\ 8t)$ ,式中 $t$ 是被测时间间隔.

#### 6. 测温仪表

实验室常用测温仪表主要有水银温度计、电阻温度计、热电偶和光测高温计等,他们的最大允许误差见表4.

表4 测温仪表的最大允许误差 单位:  $^{\circ}\text{C}$

测温仪器	测温范围	最大允许误差
普通水银温度计	0~100	$\pm 1$
精密水银温度计	0~100	$\pm 0.2$
铜热电阻	-50~150	$\pm (0.3 + 0.000\ 6t)$
铂热电阻	-200~855	$\pm (0.3 + 0.000\ 5t)$
工业铂铑-铂热电偶	600~1\ 300	$\pm 0.3\% \times t$
工业光测高温计	2\ 000以下	$\pm 20$

## 7. 电气指示仪表

电气指示仪表,如电压表、电流表等,他们的最大允许误差与该仪表的准确度等级、量程这两个参数有关.若准确度等级为  $a$ ,量程为  $X_m$ ,则最大允许误差可以表示为

$$\Delta_{\text{允}} = a\% \times X_m$$

如某电流表,准确度等级为 1.0,量程为 500 mA,则最大允许误差为

$$\Delta_{\text{允}} = 1.0\% \times 500 = 5 \text{ mA}$$

按国家标准,电气指示仪表的准确度等级有 0.1、0.2、0.5、1.0、1.5、2.5、5.0 七个等级.

## 8. 数字测量仪表

数字测量仪表是能把连续的被测量自动地变成断续的、用数字编码方式的、以十进数字自动显示测量结果的测量仪表.数字测量仪表的种类很多,根据仪表的用途,有数字电压表、数字欧姆表、数字电流表、数字瓦特表、数字  $Q$  表、数字静电计、电子计数器等.经过适当变换,还可测量许多非电量,如数字温度计、数字转速表、数字测厚仪、数字高斯计、数字频率计、数字毫秒计、数字卡尺、数字千分尺、数字天平、数字电桥、数字电位差计等.数字测量仪表具有准确度高、灵敏度高、输入阻抗高等特点.

例如,数字电压表,他的准确度可达到  $a = 0.0005$  级,它的允许误差可以写成

$$\Delta_{\text{允}} = \pm (a\% U_x + b\% U_m)$$

式中  $U_x$  是测量值, $U_m$  是满度值, $a$  是准确度等级, $b$  是固定项系数. $a$  和  $b$  可以在仪器说明书中查到.

## 9. 直流电桥

直流电桥的最大允许误差为  $\Delta_{\text{允}} = \pm C\% (R_n/10 + R_x)$

式中  $C\%$  是准确度等级指数, $R_x$  是测量值, $R_n$  是基准值,该基准值与测量时所用量程有关,取值为该量程内 10 的最大整数幂.例如,使用量程为“ $\times 1$ ”挡,则量程为 9999  $\Omega$ ,这时该量程内 10 的最大整数幂是  $10^3$ .

## 10. 直流电位差计

直流电位差计的最大允许误差为  $\Delta_{\text{允}} = \pm C\% (V_n/10 + V_x)$

式中  $C\%$  是准确度等级指数, $V_x$  是测量值, $V_n$  是基准值,与测量时所用量程有关,取值为该量程内 10 的最大整数幂.

## 附录 2 袖珍计算器的使用

利用袖珍计算器进行实验数据的处理,能够大大缩短运算时间,明显地提高学习效率.

同学们在选购计算器时,要注意它的使用功能.根据物理实验数据处理的需要,计算器应具备如下三种功能:普通运算、统计运算和双变量线性回归运算.如 SC-106 A、CASIO $fx-180$  P、CASIO $fx-82TL$  等都具备上述三种功能.

也有些计算器如 SHARP  $EL-5812$ 、CASIO $fx-140$  等,只具备普通运算和统计运算功能,而不具备回归运算功能,选购时应予注意.如果手头已经有了这样的计算器,为了降低学习成本,也可以勉强使用.

电子计算器使用键盘符号的汇编语言,直接用按键输入,运算结果由显示器显示,可直接读出.

下面分别以 SHARP  $EL-5812$ 、SC-106 A 及 CASIO $fx-82TL$  三种型号的计算器为例,简要介绍统计运算和双变量线性回归运算的键盘操作程序.

## 1. 统计运算

今有一测量列:

1.23、1.23、1.22、1.21、1.23、1.25、1.24、1.23、1.23、1.24. 求:

平均值  $\bar{x}$ ;

实验标准差  $S(x_i)$ ;

平均值的标准差  $S(\bar{x})$ .

(1) 使用 SHARP  $EL-5812$  型计算器

先按“2ndF”和“STAT”键,使计算器处于“STAT”(统计运算)状态.操作程序见表 5.

表 5 SHARP  $EL-5812$  统计运算的键盘操作程序

操 作	显 示	注 解
2ndF STAT	STAT 0	计算器进入统计运算状态
1.23 M+	1	第 1 个数据输入完毕
1.23 M+	2	第 2 个数据输入完毕
1.22 M+	3	第 3 个数据输入完毕
1.21 M+	4	第 4 个数据输入完毕
1.23 M+	5	第 5 个数据输入完毕
.....	.....	继续输入第 6、7、8、9 个数据

续表

操 作	显 示	注 解
1.23 SHIFT ; 5 DT	1.23 ; 5	输入 1.23 共 5 次
1.24 DT DT	1.24	输入 1.24 共 2 次
1.25 DT	1.25	输入 1.25 一次
SHIFT X =	1.231	平均值
SHIFT $s\sigma_{n-1}$	0.011 005	实验标准差
$+ \sqrt{10} =$	0.003 48	平均值的标准差

## 2. 回归运算的操作程序

使用 SHARP - EL5812 和 CASIO  $fx-140$  型计算器也可以根据式(29)、(30)进行回归运算,但键盘操作比较复杂,既要用到普通运算功能,又要用到统计运算功能,费力又费时.若使用 SC-106 A 或 CASIO  $fx-82TL$  等型号的计算器进行回归运算,则十分快捷.只要将数据按规定的程序输入到计算器中,再按相应的按键,运算结果会立刻显示出来.下面举例说明.

若铁棒的伸长与温度的增长是线性关系,测量数据如表 8,试求回归常数  $A$ 、回归系数  $B$  和相关系数  $r$ .

表 8 温度与棒长的数据

$t/^\circ\text{C}$	10	15	20	25	30
$L/\text{mm}$	1 003	1 005	1 008	1 010	1 014

## (1) 使用 SC-106 A 型计算器

先按“MODE”和“2”,使计算器处于“LR”(回归运算)状态,操作程序见表 9.

表 9 SC-106 A 回归运算的键盘操作程序

操 作	显 示	注 解
MODE 2	LR	进入回归运算状态
KAC	0	清零
10 $X_D Y_D$ 1003 DATA	1003	输入第 1 对数据
15 $X_D Y_D$ 1005 DATA	1005	输入第 2 对数据
20 $X_D Y_D$ 1008 DATA	1008	输入第 3 对数据
25 $X_D Y_D$ 1010 DATA	1010	输入第 4 对数据

续表

操 作			显 示	注 解
30	$X_0 Y_0$	1014 DATA	1014	输入第 5 对数据
SHIFT		A	997.2	回归常数
SHIFT		B	0.5	回归系数
SHIFT		r	0.992 5	相关系数

(2) 使用 CASIO  $fx-82TL$  型计算器

CASIO  $fx-82TL$  型计算器有六种类型的回归运算功能,包括线性回归、对数回归、指数回归、反回归、二次回归等.首先按“MODE”、“3”键,使计算器进入回归运算状态,再按“1”键,选择线性回归运算.操作程序见表 10.显示屏为双行显示,为排版方便,表 10 中对显示屏上的内容以单行来表示.

表 10 CASIO  $fx-82TL$  回归运算的键盘操作程序

操 作			显 示	注 解
MODE	3	1	REG 0	进入线性回归运算状态
SHIFT		Sel	Sel 0	清零
10	,	1003 DT	10,100 3 10	输入第 1 对数据
15	,	1005 DT	15,100 5 15	输入第 2 对数据
20	,	1008 DT	20,100 8 20	输入第 3 对数据
25	,	1010 DT	25,101 0 25	输入第 4 对数据
30	,	1014 DT	30,101 4 30	输入第 5 对数据
SHIFT	A	=	A 997.2	回归常数
SHIFT	B	=	B 0.54	回归系数
SHIFT	r	=	r 0.992 539 7	相关系数
18	SHIFT	$\bar{y}$	$\bar{y}$ 1 006.92	18 °C 时铁棒的长度
1000	SHIFT	x	x 5.185 185	铁棒长 1 000 mm 时的温度

## 参 考 文 献

- 1 国家质量技术监督局. JJF1059—1999 测量不确定度评定与表示. 北京:中国计量出版社,1999
- 2 国际标准化组织. 测量不确定度表达指南. 肖明耀,康金玉译. 北京:

中国计量出版社,1994

- 3 国家质量技术监督局. 测量不确定度评定与表示指南. 北京:中国计量出版社,2000
- 4 李慎安. 测量不确定度百问. 北京:中国计量出版社,2001

## 第三章 基础性实验

### 实验三 惠斯通电桥测电阻

材料所占质量的百分比. 实验室提供条件: 试样 A, 试样 B, 试样 C 各一块, 天平一台, 吊具系统一套及纯水若干.

#### 实验三 惠斯通电桥测电阻

直流电阻的测量是直流测量的主要内容. 直流电阻的测量范围从  $10^{-6} \Omega$  到  $10^{12} \Omega$ , 常用测量方法多达 20 余种. 采用电桥法测量电阻具有操作简单、读数方便、准确度高、对电源的稳定性要求不高等优点. 采用电桥替代法还可以大幅度提高测量的准确度.

##### 实验原理

##### 1. 惠斯通<sup>①</sup>电桥测电阻

图 3-1 是惠斯通电桥的原理图, 它是由四个桥臂电阻、一个电源和一个检流计组成, 其中  $R_1$ 、 $R_2$  为已知标准电阻, 称“比率臂”;  $R_3$  为可变标准电阻(电阻箱), 称“比较臂”;  $R_x$  为被测电阻, 称“测量臂”;  $B$ 、 $D$  间接检流计. 接通电路后, 检流计一般不示零, 说明  $B$ 、 $D$  两点电势不相等, 通过调节  $R_1$ 、 $R_2$  和  $R_3$  使电桥达到平衡, 此时  $B$ 、 $D$  两点电势相等, 故

$$\frac{R_x}{R_1} = \frac{R_3}{R_2} \quad (1)$$

所以

$$R_x = \frac{R_1}{R_2} R_3 \quad (2)$$

公式(1)称电桥平衡条件, 即相邻两臂电阻之比相等.

令  $C = R_1/R_2$ , 称为“倍率”, 则公式(1)可写为  $R_x = CR_3$ . 因此当电桥调平衡后, 只要读出  $C$  和  $R_3$  值, 待测电阻  $R_x$  便可以得到.

##### 2. 电桥灵敏度

电桥平衡后, 将比较臂电阻  $R_3$  增加或减少一个微小量  $\Delta R_3$ , 检流计指针偏

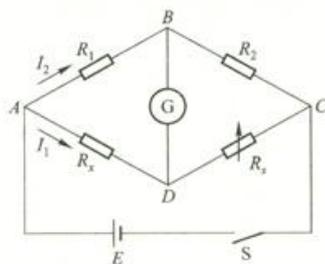


图 3-1 电桥原理图

<sup>①</sup> 惠斯通(1802—1875) 英国物理学家、伦敦皇家学会会员. 从事电磁学、声学、光学方面的研究. 1837年制成电磁电报机, 1843年发明了惠斯通电桥. 最先制成电阻器, 最先测量了导体中电流流过的速度. 还制成乐器, 1829年发明小协奏曲.

转  $\Delta n$  格. 如果一个很小的  $\Delta R_x$  能引起较大的  $\Delta n$  偏转, 则电桥的灵敏度就高, 电桥的平衡就能更精细判断. 因此引入电桥灵敏度的概念, 定义为

$$S = \Delta n / \frac{\Delta R_x}{R_x} \quad (3)$$

电桥灵敏度  $S$  的单位是“格”.  $S$  越大, 在  $R_x$  基础上增减  $\Delta R_x$  能引起的检流计偏转格数就越多, 电桥就越灵敏, 测量误差就越小. 如  $S = 100$  格, 表示  $R_x$  改变 1% 时, 检流计有 1 格的偏转.

选用灵敏度高、内阻低的检流计, 适当提高电源电压, 适当减小桥臂电阻, 尽量把桥臂配置成均匀状态, 有利于提高电桥灵敏度.

### 仪器介绍

#### 1. 自组电桥电路板

##### 1) 电路图

实验室根据图 3-2 所示实验线路图制成一个电路板, 为能选择不同的倍率  $C$ , 在  $AB$  间可换接三个不同阻值的电阻, 为保护检流计,  $BD$  间串接一带有单刀开关的阻流器  $R_0$ , 为控制工作电流, 在电源回路中串接一滑线变阻器  $R$ .

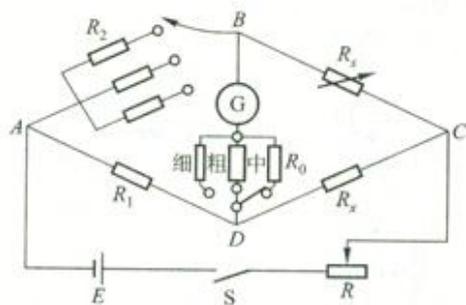


图 3-2 实验线路图

##### 2) 检流计

检流计用来检测电路中的微小电流和电压, 它有很高的灵敏度, 在精密测量中常作为指零仪表. 它的读数装置有指针式和光点复射式等多种结构, 图 3-3 所示 AC-5 型直流指针式检流计属于便携式磁电式结构, 用时需水平放置, 它的分度值为  $2 \times 10^{-6}$  A/格. 检流计的可动部分用短路阻尼的方法制动, 这样可防止张丝因机械震动而引起的变形和损坏. 当小旋钮移向红点位置时, 线圈即被短路. 使用时, 将小旋钮移向白点位置, 并用零位调节器将指针调整到零位. 按下“电计”按钮, 检流计便被接入电路. 若指针不停地摆动时, 按一下“短路”按钮, 指针便立刻停止转动. 检流计使用完毕后, 必须将小旋钮移向红点位置, “电计”和“短路”按钮应放松.



图 3-3 AC-5 型直流指针式检流计

## 2. 箱式电桥

箱式电桥是把电阻箱、检流计、电池、开关及电桥电路都装入箱内,以便于携带.以本实验室采用的 QJ23 型便携式直流单电桥(图 3-4 和图 3-5)为例,介绍箱式电桥各部件的作用及特点:

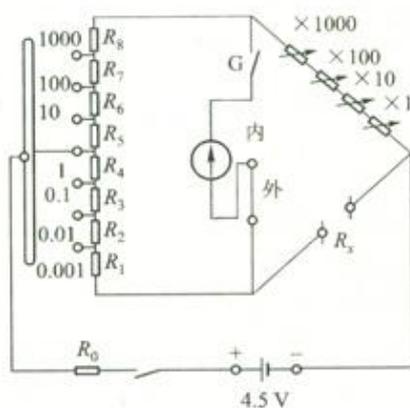


图 3-4 QJ23 电桥电路图

1) 比率臂( $R_1/R_2$ )由 8 个精密电阻组成,用一个旋钮调节,度盘示值可以从 0.001 改变到 1 000,共七挡.

2) 比较臂  $R_x$  由四个十进位电阻器盘组成,最大阻值为 9 999  $\Omega$ ,调节  $C$  和  $R_x$  使电桥达到平衡,即可得到被测电阻值.

3) 端钮  $R_x$  接被测电阻, $B_+$  和  $B_-$ 、 $G_+$  和  $G_-$  分别为外接电源、外接检流计用的接线端钮.

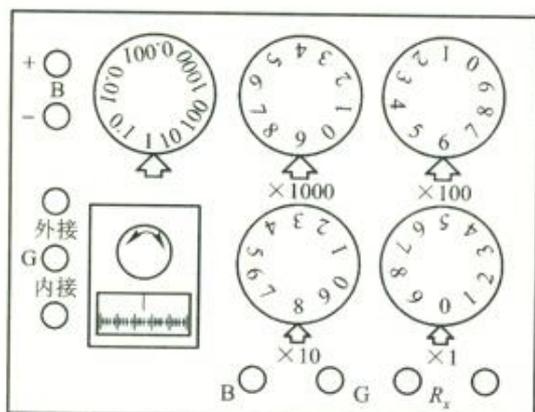


图 3-5 QJ23 电桥面板图

4) 检流计 G 用以指示电桥平衡与否, 检流计上有调零旋钮, 测量前应预先调好检流计的零位。

### 实验任务

1. 自组电桥并用自组电桥测未知电阻  $R_{x_1}$ ,  $R_{x_2}$  及它们的串并连电阻值。
2. 测量自组电桥的灵敏度。
3. 用箱式电桥测  $R_{x_1}$ ,  $R_{x_2}$  及它们的串并连电阻值。
4. 在 1 和 3 中, 各选择一组测量数据, 进行测量不确定度的分析和计算。

### 实验方法

1. 用实验室提供的电桥板、电阻箱等组装成惠斯通电桥, 并用其测量四个未知电阻。每测一个电阻, 只选择一种倍率, 使  $R_1$  能读出四位有效数字, 请事先设计好数据表, 也可参照表 1 绘制。

2. 测电桥灵敏度。电桥平衡后, 使  $R_1$  改变  $\Delta R_1$ , 记下检流计偏转格数  $\Delta n$ , 并代入式(3)。为了消除检流计指针因偏转方向造成的读数误差, 可先令  $\Delta R_{d1} = +1 \Omega$ , 记下  $\Delta n_1$ , 再令  $\Delta R_{d2} = -1 \Omega$  记下  $\Delta n_2$ , 则指针偏转量为  $\Delta n = \frac{\Delta n_1 + \Delta n_2}{2}$ 。

如果时间不够, 可只测待测电阻为  $R_{x_1}$ ,  $R_{x_2}$  情况下的电桥灵敏度。

### 注意事项

用箱式电桥 QJ23 测上述四个电阻。测量时要注意两点: 一是倍率选择要合理, 必须在  $R_1$  盘上读出四位有效数字; 二是对待测电阻的阻值事先要有一个大概的了解, 以便在通电之前能粗调  $C$  和  $R_1$ , 使电桥接近平衡状态。

## 数据处理示例

实验数据见表 1.

表 1 自组电桥测  $R_x$  的实验数据

未知电阻 标称值( $\Omega$ )	倍率 ( $R_1/R_2$ )	比较臂 $R_3$ ( $\Omega$ )	灵敏度 $S = \Delta n / \frac{\Delta R_1}{R_1}$	待测电阻 $R_x = \frac{R_1}{R_2} R_3$ ( $\Omega$ ) 示值
470	100/100	$4.686 \times 10^2$	$S = \frac{4}{10/4.686 \times 10^2}$	$4.686 \times 10^2$

相对扩展不确定度

$$\frac{U_{R_x}}{R_x} = \sqrt{\left(\frac{\Delta R_1}{R_1}\right)^2 + \left(\frac{\Delta R_2}{R_2}\right)^2 + \left(\frac{\Delta R_3}{R_3}\right)^2 + \left(\frac{0.2}{S}\right)^2}$$

$$\text{本装置} \quad \frac{\Delta R_1}{R_1} = \frac{\Delta R_2}{R_2} \approx 2\%, \quad \frac{\Delta R_3}{R_3} = 0.1\%$$

$$\text{代入得} \quad \frac{U_{R_x}}{R_x} = \sqrt{(2 \times 10^{-2})^2 + (2 \times 10^{-2})^2 + (1 \times 10^{-3})^2 + \left(\frac{0.2}{1874.4}\right)^2}$$

$$\approx 2.8 \times 10^{-2}$$

$$U_{R_x} = 2.8 \times 10^{-2} \times R_x = 2.8 \times 10^{-2} \times 4.686 \times 10^2$$

$$\approx 13.1 = 1 \times 10$$

$$R_x = R_x(\text{示值}) \pm U_{R_x} = 4.686 \times 10^2 \pm 0.1 \times 10^2$$

$$R_x = (4.7 \pm 0.1) \times 10^2 (\Omega)$$

## 阅读材料

被测电阻  $R_x$  接入电桥后,不可避免地会产生附加电阻,这个附加电阻是指  $R_x$  附带的导线电阻及连接处的接触电阻.一般情况下,附加电阻值约在  $10^{-3} \Omega$  数量级,当  $R_x$  值不很低,比如大于  $100 \Omega$  时,附加电阻对测量结果的影响可忽略不计.在被测电阻小于  $10 \Omega$ ,比如  $10 \sim 10^{-6} \Omega$  时,则附加电阻对测量结果的影响便不能忽视.在工程实践中常常要测量电机绕组、变压器绕组、电流分流器以及一段电缆线的阻值,这时就要设法消除附加电阻的影响.最常用的方法就是使

用开尔文电桥,也称汤姆孙<sup>①</sup>电桥,其电路原理见图3-6。 $R_1, R_2$ 为外比率臂电阻, $R_3, R_4$ 为内比率臂电阻, $R_x$ 与 $R_4$ 之间的连线 $r$ 称为跨线。开尔文电桥比惠斯通电桥多了一个比率臂,故前者称为单臂电桥,后者称为双臂电桥。

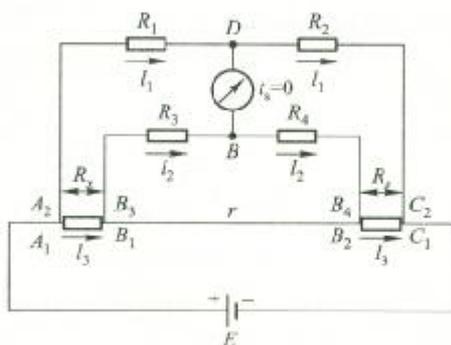


图3-6 双臂电桥线路图

图3-7是QJ44型携带式直流双臂电桥的线路。该电桥测量的基本量限为 $0.001 \sim 11 \Omega$ ,准确度等级为0.2级。图3-8是它的面板图。将图3-7和图3-6的线路进行比较可知,线路图3-7或面板图3-8中的 $C_1, C_2$ 和 $P_1, P_2$ 接待测电阻 $R_x$ 。图中的滑线读数盘和步进读数相当于图3-6中的已知电阻 $R_1$ ,只不过在这里 $R_1$ 被分成连续可变和跳跃可变两部分。倍率读数(有100, 10, 1, 0.1, 0.01五挡)即为图3-6中 $R_1/R_2$ 和 $R_3/R_4$ 的值。B为接通电源的按钮。本仪器附带具有微电流放大作用的检流计——晶体管检流计。G为接通检流计的按钮;

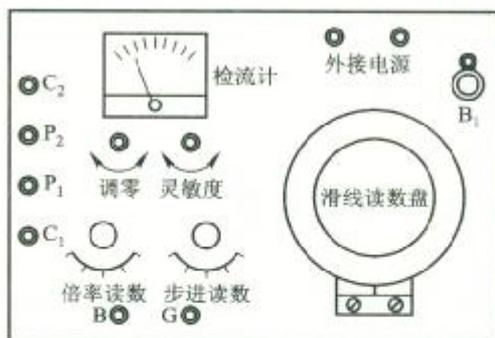


图3-7 QJ44型直流双臂电桥线路图

<sup>①</sup> 汤姆孙(1824—1907) 英国物理学家,热力学的奠基人之一,伦敦皇家学会会员,1890~1895年任该会会长;1892年被授予开尔文勋爵称号;1851年提出了热力学第二定律,1948年提出了绝对温标,1856年建立了温差电现象的热力学理论,对电磁现象进行了富有成就的研究,制成了一系列的电磁测量仪器,如电流计、静电计、双臂电桥等。

“调零”旋钮为晶体管检流计的零点调节器;“灵敏度”旋钮用来调节晶体管检流计的灵敏度.刚开始调平衡时,应使电桥灵敏度较低,当接近平衡时,顺时针转动旋钮,使其灵敏度逐步增大.

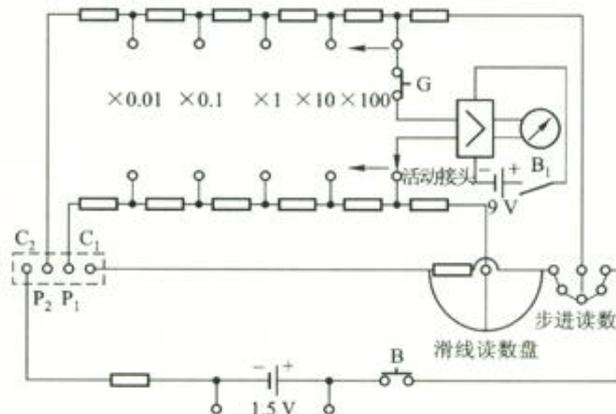


图 3-8 QJ44 型直流双臂电桥面板图

### 创新园地

用本实验室提供的电桥板来测电阻,其扩展不确定度  $\frac{U}{R_x} > 2$ ,原因何在?

现在要求你仍然用这个自组电桥板来测同一个电阻,扩展不确定度  $\frac{U}{R_x} < 0.1\%$ ,应该怎样操作?

提示:用替代法还是交换法?

## 实验四 转动惯量的测量

转动惯量的测量在工交、科技和军事部门都具有重要意义.例如电动机的工作性能就依赖于转动惯量的正确设计,直升飞机的飞行稳定性则与它的飞轮的转动惯量密不可分.转动惯量是描述刚体转动惯性大小的物理量,它不仅取决于刚体的总质量,而且与刚体的形状、质量分布以及转轴位置有关.对于质量分布均匀、具有规则几何形状的刚体,可以通过数学方法计算出它绕给定转动轴的转动惯量.对于质量分布不均匀、几何形状不规则的刚体,用数学方法计算其转动惯量是相当困难的,通常要用实验的方法来测定.因此,学会用实验的方法测定刚体的转动惯量具有重要的实际意义.

## 实验五 铜电阻和热敏电阻的温度特性

也可写成  $T = 1.021(1 \pm 0.58\%)(s)$  (15)

将表1及式(15)中的数据代入式(9)中,得

$$\begin{aligned} \bar{J}_0 &= \frac{1.9975 \times 9.81 \times 0.20010 \times 0.12004 \times 1.021^2}{16\pi^2 \times 0.5862} \\ &= 7.334 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \end{aligned} \quad (16)$$

相对扩展不确定度为

$$\begin{aligned} \frac{U_{J_0}}{J_0} &= \sqrt{\left(\frac{U_m}{m}\right)^2 + \left(\frac{U_D}{D}\right)^2 + \left(\frac{U_h}{h}\right)^2 + \left(\frac{U_T}{T}\right)^2} \\ &= \sqrt{\left(\frac{0.0001}{1.9975}\right)^2 + \left(\frac{0.00002}{0.20010}\right)^2 + \left(\frac{0.00002}{0.12004}\right)^2 + \left(\frac{0.005}{0.5862}\right)^2 + \left(\frac{0.006}{1.201}\right)^2} \end{aligned}$$

比较根号内各项数值大小,前三项可作为微小量而忽略不计,最终得到

$$\frac{U_{J_0}}{J_0} = 0.0099 = 0.99\% \quad (17)$$

由式(5)和式(6)得大圆盘空载时的转动惯量为

$$J_0 = 7.334 \times (1 \pm 0.99\%) \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

### 实验五 铜电阻和热敏电阻的温度特性

接触式温度传感器主要有四种类型:膨胀式、压力式、热电式和电阻式。电阻式温度传感器又包括金属热电阻和半导体热敏电阻两大类。它们都能把温度信号转变为电信号,容易实现对温度的自动测量和自动控制,因而获得了十分广泛的应用。电阻温度特性是最重要的性能指标,本实验要求学生利用双变量测量法来测量铜热电阻和负温度系数热敏电阻的温度特性。

#### 实验原理

绝大多数金属当温度升高时,其电阻值也随之增大,利用这一规律制成的金属电阻称为金属热电阻,也可简称热电阻。热敏电阻是由半导体材料制成的,与热电阻相比,半导体热敏电阻对温度的变化更敏感,灵敏度更高。电阻值随温度变化的规律称为温度特性。由于金属能够提纯,所以热电阻的稳定性和互换性较好,而半导体中的杂质难以控制,所以热敏电阻的稳定性和互换性较差。

##### 1. 铜热电阻的温度特性

制作热电阻的材料主要有铂(Pt)、铜(Cu)和镍(Ni),在通常情况下,它们的测温范围分别是 $200 \sim 850^\circ\text{C}$ 、 $-50 \sim 150^\circ\text{C}$ 、 $-60 \sim 180^\circ\text{C}$ 。其中铜比较容易提纯,温度特性比较接近直线,价格也比较便宜,所以常被优先选用,铜热电阻器是

由提纯后的铜丝绕制成  $50\ \Omega$  和  $100\ \Omega$  两种规格,封装在圆柱形金属管内,所以它的体积不可能做得很小.

铜热电阻的阻值随温度变化的规律是

$$R_t = R_0(1 + \alpha t + \beta t^2 + \gamma t^3) \quad (1)$$

式中,  $R_0$  和  $R_t$  分别是温度为  $0\ ^\circ\text{C}$  和  $t\ ^\circ\text{C}$  时的阻值;  $\alpha, \beta, \gamma$  是常数, 其中  $\alpha = 4.29 \times 10^{-3}/^\circ\text{C}$ ,  $\beta = -2.13 \times 10^{-7}/^\circ\text{C}$ ,  $\gamma = 1.23 \times 10^{-9}/^\circ\text{C}$ . 由于  $\beta$  和  $\gamma$  很小, 在很多场合下可近似地表示为

$$R_t = R_0(1 + \alpha t)$$

式中,  $\alpha = \frac{1}{R_0} \frac{R_t - R_0}{t}$  称为电阻温度系数. 由上式可见,  $\alpha$  是温度变化  $1$  度时阻值的变化量与  $R_0$  的比值. 一般铜导线材质的纯度不高, 其  $\alpha$  值会稍小一些, 约为  $(4.25 \times 10^{-3} \sim 4.28 \times 10^{-3})/^\circ\text{C}$ , 材质越纯, 越接近  $4.29 \times 10^{-3}/^\circ\text{C}$ .

## 2. 热敏电阻的温度特性

与热电阻相比, 半导体热敏电阻具有灵敏度高、体积小、反应快等优点. 大多数热敏电阻具有负的温度特性, 称为 NTC (也称 MF) 型热敏电阻, 其阻值与温度的关系可表示为

$$R_T = R_{T_0} e^{B(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0})} \quad (2)$$

式中,  $R_{T_0}$  和  $R_T$  分别是温度为  $T_0$  (K) 和  $T$  (K) 时的阻值;  $T$  和  $T_0$  是开尔文温标;  $B$  是材料常数, 单位是 K. 也有些热敏电阻具有正的温度特性, 称为 PTC (也称 MZ) 型热敏电阻, 其阻值与温度的关系可表示为  $R_T = R_{T_0} e^{B(T - T_0)}$ , 热敏电阻的主要性能指标是:

- 1) 标称值  $R_n$ , 是指  $25\ ^\circ\text{C}$  时的阻值.
- 2) 温度系数  $\alpha_T$ , 定义为温度变化  $1$  度时阻值的变化量与该温度下的阻值之比

$$\alpha_T = \frac{1}{R} \frac{dR_T}{dT} \quad (3)$$

将式(2)代入式(3), 得

$$\alpha_T = -\frac{B}{T^2} \quad (4)$$

$\alpha_T$  不仅与材料常数有关, 还与温度有关, 低温段比高温段更灵敏, 如果不作特殊说明, 是指  $T = 293\ \text{K}$  时的  $\alpha_T$ . 材质不同,  $\alpha_T$  也有很大差别, 大约为  $(-3 \sim -6) \times 10^{-2}/\text{K}$ . 它比热电阻的  $\alpha$  高出  $10$  倍左右. 图 5-1 是 Cu 电阻和某一负温度系数热敏电阻的温度特性曲线.

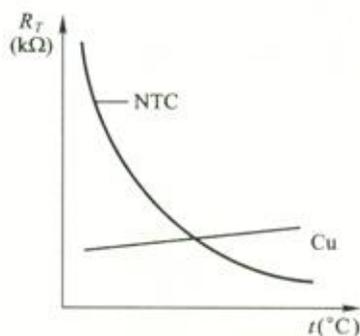


图 5-1 Cu 和 NTC 热敏电阻的温度特性

3) 材料常数  $B$  是与材质有关的常数, 对 NTC 型热敏电阻来说,  $B$  值约为 1 500 ~ 6 000 K. 式(2)两边取对数, 得

$$\ln R_T = \ln R_{T_0} + B \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \quad (5)$$

令  $\ln R_T = y$ ,  $\ln R_{T_0} - \frac{B}{T_0} = A$ ,  $\frac{1}{T} = x$  则式(5)变为

$$y = A + Bx \quad (6)$$

$B$  就是方程(6)的斜率, 通过对  $\frac{1}{T}$ 、 $\ln R_T$  的线性回归可求  $B$  值.

4) 工作温度, 是指它的测温范围. 由式(4)可见热敏电阻的温度系数在高温段急剧下降, 其工作温度一般不能超过 300 °C. 表 1 列出了两种规格的热敏电阻的有关数据.

表 1 热敏电阻的性能指标

型号	$R_H$ (k $\Omega$ )	$\alpha_T$ (%/°C)	$B$ (K)	工作温度 (°C)
MF51	0.1 ~ 1 000	-(1.8 ~ 6.8)	1 500 ~ 6 200	< 300
MF57	0.2 ~ 10	-(3.9 ~ 5.0)	3 450 ~ 4 400	-55 ~ 125

### 仪器介绍

本实验所用仪器主要有箱式电桥、电热杯及水银温度计. 箱式电桥的使用方法见实验三, 电热杯的使用方法见实验室提供的使用说明书.

### 实验任务与方法

1. 测绘 Cu 热电阻的温度特性曲线实验装置如图 5-2 所示, 在电热杯中

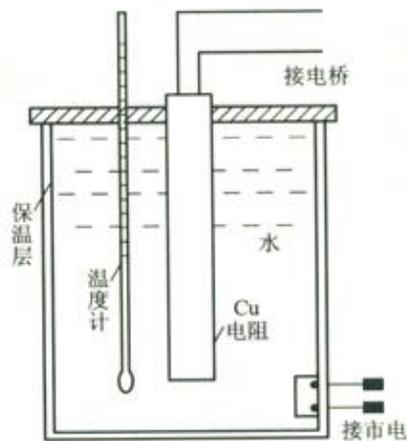


图 5-2 测 Cu 热电阻温度特性实验装置

加冷水,在冷水升温过程中测水温和铜热电阻的阻值.从  $10 \sim 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,不少于 8 个观测点.根据温度特性曲线求出温度系数  $\alpha_0$ .

2. 测绘半导体热敏电阻的温度特性曲线.求  $R_H, \alpha_T, B$ .

### 注意事项

1. 要注意直流电桥和温度计读数的“同时性”问题.例如,以下的操作就未做到读数的同时性,当温度升到某一值时,对电热杯断电,再调电桥平衡,记下电阻值,然后再读温度值.这一操作程序是不合理的,原因是电桥断电后到读取温度值这一段时间内,水温仍在上升.

2. 求  $B$  值的方法不是唯一的,但以作图法为最好.

### 阅读材料

#### 热电阻和热敏电阻的特点

1. 金属热电阻应具备的特点:

- 1) 材料的物理和化学性质必须稳定,这样才能有较好的复现性;
- 2) 电阻温度系数要大,这样才能有较高的灵敏度;
- 3) 电阻率要大,这样敏感元件才有可能做到小型化;
- 4) 电阻和温度必须单值对应,最好具有线性关系;

5) 材料要容易提纯,做到分批复制而温度特性保持不变,这样才能有较好的互换性.

对于任何一种金属,很难同时满足上述条件.经过对大量金属材料的比较、研究,只有为数不多的几种金属适合做敏感元件,如铂、铜、镍等.目前世界各国广泛使用的是前两种.

铂的优点是物理和化学性质非常稳定,可以用来制造标准温度计(不确定度可达  $0.005\text{ }^{\circ}\text{C}$ ),还可以在高温(可达  $1\ 000\text{ }^{\circ}\text{C}$ )和低温(可达  $13\text{ K}$ )下使用.铜的特点是容易提纯,价格便宜,但容易氧化,所以只能在低于  $150\text{ }^{\circ}\text{C}$  的温度下和无腐蚀性的环境中使用.

2. 热敏电阻的特点

用来控温和测温的热敏电阻大多具有负的温度特性.负温度系数热敏电阻的特点是:

- 1) 阻值对温度的变化特别敏感,其灵敏度比热电阻高出一个数量级;
- 2) 体积小、重量轻、热惯性小,它对温度变化快、热容量小及在狭窄的温度场更为适用;
- 3) 电阻值大,引线电阻所占比例小,适合于远距离测量和控制;
- 4) 制造简单,寿命长,价格便宜.

## 实验六 冲击法测量磁场

热敏电阻的缺点是非线性度大,稳定性和复现性差.随着半导体技术的发展和工艺的进步,目前市场上已经出现了稳定性和互换性均较好的产品.

### 创新园地

1. 试说明热敏电阻测温比热电阻测温有什么优缺点.
2. 利用非平衡电桥电路,可以制成热敏电阻温度计(见实验五十一),试问可以用铜电阻代替热敏电阻吗?
3. 图 5-3 提供了一个新的热敏电阻测温电路, $R_T$  变化时,AD 输出端  $D$  也将发生变化,请简要分析一下该电路的测温原理.实验台上摆放着该电路的实物元件,请你按图组装一台温度计,看看是否能够测温. $R_2$  的大小应是  $R_T$  测温范围中值时的阻值.

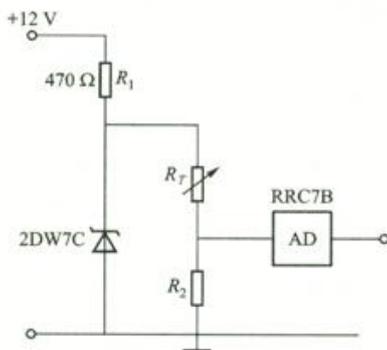


图 5-3 热敏电阻测温电路

## 实验六 冲击法测量磁场

磁场测量是电磁测量技术的一个重要分支,在工业生产和科学研究的许多领域都要涉及到磁场测量的问题,在医学和生物学方面也有重要应用.近 30 多年来,磁场测量技术发展很快,目前常用的磁场测量的方法有十多种.例如电磁感应法、核磁共振法、霍尔效应法等.本实验采用冲击法测定螺线管的轴向磁场分布.

### 实验原理

冲击电流计名为“电流计”,实际上并不是用来测定电流的,而是用来测量短时间内脉冲电流所迁移的电量.它还可以用来进行与此有关的其他方面

的测量,如测量磁感应强度、高电阻、电容等等.冲击电流计与灵敏电流计结构相仿,区别仅在于它的线圈较扁而宽,或在小镜和线圈之间再接一个小圆盘(见图6-1),从而使线圈转动惯量  $J$  较大,线圈的自由振荡周期  $T_0$  较长 ( $T_0 = 2\pi\sqrt{\frac{J}{D}}$ ,  $D$  为悬丝的扭转系数),一般灵敏电流计的  $T_0$  约  $1 \sim 2$  s,而冲击电流计的  $T_0$  都大于  $10$  s.

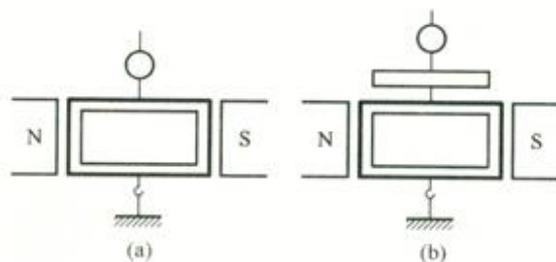


图 6-1 冲击电流计的线圈

### 1. 用冲击电流计测电量 $q$

设有一脉冲电流  $i$  通过冲击电流计的线圈,它所迁移的电量为

$$q = \int_0^{\tau} i dt \quad (1)$$

式中  $\tau$  为电流通过冲击电流计的时间,如果  $T_0 \gg \tau$ ,可以证明线圈第一次的最大偏角(称作冲掷角)与电量  $q$  成正比,即

$$\alpha_m = kq \quad (2)$$

式中比例系数  $k$  决定于冲击电流计的结构及其外电路的参数.

为了测量上式中的偏转角  $\alpha_m$ ,采用图 6-2 所示的镜尺(有的是望远镜)读数系统.

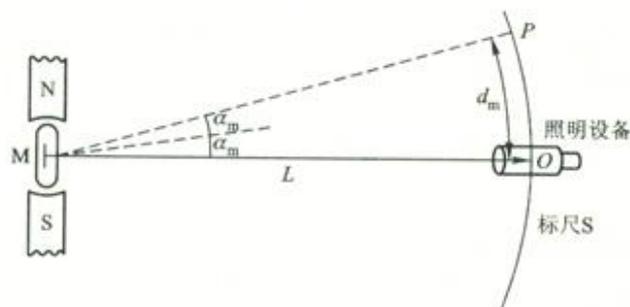


图 6-2 冲击电流计的镜尺读数系统

无电流通过时调整照明设备上标尺  $S$  的位置,直到看到反射光标中的竖线与标尺  $S$  的零点线重合.有冲击电流通过时,线圈在磁场中往复摆动,也带动反

射镜同步摆动,最大冲掷角为  $\alpha_m$ ,此时反射光标中的竖线在标尺上移动的距离为  $d_m$ ,于是式(2)可写成

$$q = C_q d_m \quad (3)$$

式中比例系数  $C_q$  称为电量冲击常数, $C_q$  与电流计的结构、外电路电阻有关.若已知  $C_q$ ,并测出  $d_m$ ,由式(3)可求出电量  $q$ .

## 2. 用冲击电流计测量磁感应强度的原理

将冲击电流计与一探测线圈串联,并与一电阻  $R$  等组成闭合电路.当探测线圈内磁通量发生脉冲式变化  $d\varphi$  时,探测线圈两端产生脉冲式感应电动势

$$E_s = - \frac{d\varphi}{dt}$$

感应电动势在电路中产生脉冲式感应电流

$$i = - \frac{1}{R} \frac{d\varphi}{dt}$$

在脉冲电流  $i$  持续的时间  $\tau$  内,通过冲击电流计的电荷迁移量为

$$q = \int_0^{\tau} i dt = - \frac{1}{R} \int_{\varphi_0}^{\varphi_{\tau}} d\varphi = \frac{1}{R} (\varphi_0 - \varphi_{\tau}) = \frac{1}{R} \Delta\varphi$$

将式(3)代入上式,得

$$\Delta\varphi = Rq = RC_q d_m = C_{\varphi} d_m \quad (4)$$

式中,  $C_{\varphi} = RC_q$  称为磁通冲击常数(请问  $R$  由哪几部分电阻组成),式(4)可以通过实验来确定.此式说明,冲击电流计光标的最大偏转量  $d_m$  与探测线圈中的磁通变化量  $\Delta\varphi$  成正比,根据这一关系,由冲击电流计的最大偏转值  $d_m$  可以求出探测线圈处磁感应强度的变化量.

### 1) 螺线管内的磁感应强度及其测量原理

如图 6-3 所示的螺线管,单位长度上线圈匝数为  $n$ 、长为  $L$ 、直径为  $D$ .当通有电流  $I$  时,螺线管内轴线上某点  $P$  的磁感应强度的理论值为:

$$B = \frac{1}{2} \mu_0 n I (\cos \alpha - \cos \beta) \quad (5)$$

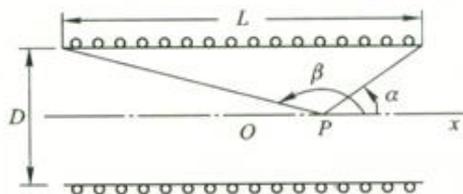


图 6-3 螺线管

真空磁导率  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$ ;  $B$  沿  $x$  轴的分布曲线如图 6-4 所示.

当  $L \gg D$  时,螺线管中心附近的磁感应强度为  $B_0 = \mu_0 n I$ ,在螺线管轴线的

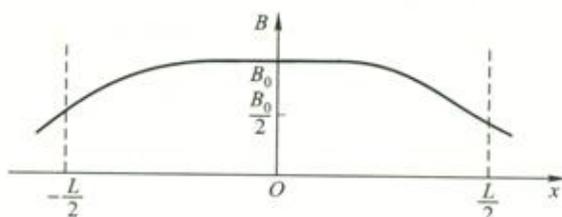


图 6-4 螺线管内轴线上的磁感应强度分布

一端,磁感应强度为  $B_m = \frac{1}{2}\mu_0 nI$ ,用冲击电流计测量螺线管磁感应强度的电路如图 6-5 所示.

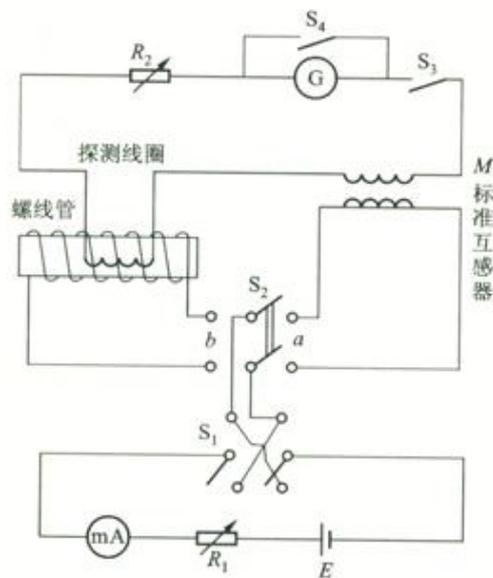


图 6-5 用冲击法测量磁感应强度装置图

测量螺线管内的磁场时,将选择开关  $S_2$  打向  $b$  处,这时电源  $E$  通过开关  $S_1$ ,向螺线管提供励磁电流  $I$ ,设探测线圈的匝数为  $N$ ,平均截面积为  $S$ ,而且探测线圈的法线与  $B$  的方向一致,则通过探测线圈的磁通量为

$$\varphi = NSB$$

使  $S_1$  换向,励磁电流由  $I$  迅速变为  $-I$ ,这时螺线管中电流变化  $\Delta I = 2I$ ,探测线圈内磁通变化量为

$$\Delta\varphi = 2\varphi = 2NSB$$

探测线圈处的磁感应强度为

$$B = \frac{\Delta\varphi}{2NS}$$

将式(4)代入,可以得到

$$B = \frac{C_{\varphi}}{2NS}d_m \quad (6)$$

### 2) 磁通冲击常数 $C_{\varphi}$ 的测定

将图 6-5 中选择开关  $S_2$  打向  $a$  处,使电流  $I_0$  通过标准互感器的初级线圈,它的互感系数为  $M$ ,利用换向开关  $S_1$ ,使电流从  $I_0$  变为  $-I_0$ ,即电流有一瞬间变化量  $\Delta I = 2I_0$ ,这时互感器次级线圈内的磁通变化量为

$$\Delta\varphi = M\Delta I_0 = 2MI_0 \quad (7)$$

若冲击电流计的最大偏转值为  $d_0$ ,由式(4)得

$$C_{\varphi} = \frac{2MI_0}{d_0} \quad (8)$$

式中互感系数  $M$  是已知的,  $I_0$  由电流表读出,  $C_{\varphi}$  的大小与电流计回路总电阻  $R$  ( $R$  是电阻箱电阻  $R_2$ 、探测线圈的直流电阻、标准互感器次级线圈的直流电阻及冲击电流计的内阻总和)有关,因此在测量  $C_{\varphi}$  和  $B$  的过程中,要保持回路总电阻不变,不管是测量  $C_{\varphi}$  还是磁感应强度  $B$ ,探测线圈和标准互感器次级线圈要始终串联在电流计回路中,电阻箱的电阻不能再改变.于是式(6)可改写为

$$B = \frac{MI_0d_m}{NSd_0} \quad (9)$$

## 仪器介绍

本实验所用仪器主要有直流镜式检流计、标准互感器、直流稳压电源、螺线管及探测线圈、滑线式变阻器、交直流安培表、双刀双掷开关、换向开关、光照设备、电源变压器等.

## 实验任务

1. 分析、连接测量电路.
2. 测量磁通冲击常数  $C_{\varphi}$ .
3. 测定螺线管轴上的磁感应强度及其分布.

## 实验方法

1. 按图 6-5 分析、连接测量电路. 整个电路由三个回路组成.  $S_1$  闭合,  $S_2$  合向  $a$ , 直流电源与标准互感器线圈的初级线圈接通,用以测

量  $C_p$ ;

$S_1$  闭合,  $S_2$  合向  $b$ , 直流电源与螺线管接通, 构成磁化电流回路, 用以测量  $B$ ;

冲击电流计  $G$ 、外电阻  $R_2$  (电阻箱)、标准互感器的次级线圈、螺线管内的探测线圈构成电流计回路. 电流计的外电阻的取值应使电流计处于临界状态附近, 根据电流计铭牌指示, 应使其外电路总电阻稍大于它的外临界电阻.

调整好冲击电流计的镜尺读数系统, 使反射光标的竖线正对标尺的零线 (平衡位置). 为了保护冲击电流计和避免螺线管发热, 开关  $S_3$  和  $S_1$  在观测数据时方能先后接通, 测读数据后随即断开.

### 2. 测量磁通冲击常数 $C_p$ .

1) 将  $S_3$  断开,  $S_2$  倒向  $a$ ,  $R_1$  调至最大值, 接通  $S_1$ , 逐渐减小  $R_1$ , 使流过标准互感器的电流  $I_0$  小于其额定值. 记下  $I_0$  值.

2) 接通  $S_3$ ,  $S_1$  迅速反向, 记录光标的最大偏转  $d_{0x}$ . 利用阻尼开关  $S_4$  使光标回到平衡位置.  $S_4$  断开, 再迅速把  $S_1$  反向, 在反方向又读得一个最大偏转  $d_{0y}$ , 取其平均值  $\bar{d}_0$ .

### 3. 测定螺线管内的磁感应强度沿轴线上的分布

1)  $S_2$  倒向  $b$ , 接通  $S_1$ , 调节  $R_1$  使流过螺线管的电流达到规定值  $I$ . (想一想, 在这个操作过程中  $S_3$  应闭合还是断开?)

2) 将探测线圈安置在螺线管轴的中心. 迅速把  $S_1$  反向, 记录光标的最大偏转  $d_{mx}$ . 利用阻尼开关  $S_4$  使反射竖线迅速回到零点位置. 待光标稳定后迅速把  $S_1$  反向记录光标在反方向的最大偏转  $d_{my}$ , 取其平均值  $\bar{d}_m$  作为最大偏转. (在这个过程中  $S_3$  应闭合还是断开?)

3) 保持电流  $I$  不变. 向右 (或左) 约隔 1 cm 逐次移动探测线圈, 重复步骤 2) 中的测量方法, 记下各处光标最大偏转的平均值  $\bar{d}_{m1}$ 、 $\bar{d}_{m2}$ 、 $\dots$ , 直至螺线管端部. 在靠近端部偏转值变化大的区段, 测量间隔可小些.

### 注意事项

1. 冲击电流计均已基本调节校正好, 可直接使用, 切勿自行拆装与拨动悬丝等, 以防损坏.

2. 接通电源之前应请教师检查线路.

3. 冲击电流计用完应将电流计线圈两端短路, 防止意外振动损坏仪器.

4.  $R$  调好后, 在测量过程中不可再改变, 否则  $C_p$  要重测.

### 数据处理示例

1. 将主要仪器的型号、级别, 实验参数及测量数据记入表格, 见表 1、表 2、

表 3.

2. 计算螺线管轴线各处  $B$  值, 并作  $B-X$  曲线.
3. 计算螺线管中点和端点处  $B$  的实验值和理论值的相对百分误差.  
(第 2 项、第 3 项内容由学生自己做)

表 1 仪器参数

螺线管线圈				探测线圈		
总长 $L/\text{cm}$	总匝数 $N_0$	平均直径 $D/\text{cm}$	单位长度 匝数 $n$	总长 $l/\text{cm}$	总匝数 $N$	截面积 $S/\text{m}^2$
28.0	2 900	2.65	104	1.20	1 100	$28.45 \times 10^{-6}$

表 2 测磁通常数

$I_0/\text{A}$		0.600			0.500			0.400		
$d$	左	38.2	38.5	38.1	27.0	26.8	26.7	24.4	24.4	24.2
	右	38.6	38.5	38.4	26.9	27.2	27.3	24.3	24.3	24.2
	平均	38.38			26.98			24.30		
$C_\mu$		$3.13 \times 10^{-5}$			$3.71 \times 10^{-5}$			$3.29 \times 10^{-5}$		
$\bar{C}_\mu$		$3.21 \times 10^{-5}$								

表 3 测  $B$  沿轴线分布 $I = 0.500 \text{ A}$ 

$x/\text{cm}$	0.00	1.00	2.00	3.00	4.00	5.00	6.00	7.00	8.00	9.00	10.00	……	
$d$	左	6.38	10.75	12.25	12.69	12.96	12.98	13.07	13.08	13.08	13.10	13.09	……
	右	6.29	10.69	12.19	12.64	12.88	12.97	13.11	13.12	13.05	13.13	13.13	……
	平均	6.34	10.72	12.22	12.67	12.92	12.98	13.09	13.10	13.07	13.12	13.11	……
$B/10^{-3}\text{T}$	3.25	5.50	6.27	6.50	6.63	6.66	6.71	6.72	6.70	6.73	6.72	……	

## 阅读材料

## 冲击电流计

冲击电流计的结构简图见图 6-6, 图中用绝缘导线绕制成的矩形线圈 1 在导电的弹性悬丝 2 的作用下稳定地处于磁铁 6 产生的磁场  $B_0$  中. 间隙中的磁场分布呈辐射状且较强. 线圈下方的圆盘 5 用以增大转动部件的转动惯量  $J$ , 固定在悬丝上的小镜 4 用来观测线圈的偏转角  $\alpha$ . 由于悬丝细而长, 其扭转系数  $W$  很小且无机械摩擦存在, 所以冲击电流计灵敏度很高. 由于转动惯量  $J$  很大, 所以其自由振荡频率  $\omega_0$  很低, 即自由振荡周期长. 这是冲击电流计的两个主要特点. 设线圈匝数为  $N$ , 面积为  $S$ , 转动部分的总阻尼系数为  $\rho$ . 当流过线圈的瞬时电流为  $I$  时, 运动方程为

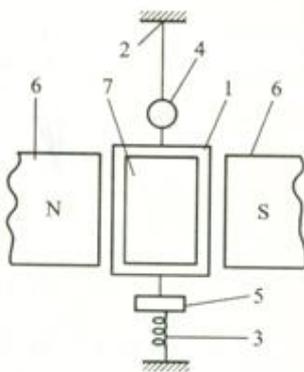


图 6-6 冲击电流计结构简图

1. 矩形线圈 2. 弹性悬丝 3. 弹簧 4. 小镜 5. 圆盘 6. 磁铁;  
7. 线圈芯

$$J \frac{d^2 \alpha}{dt^2} + \rho \frac{d\alpha}{dt} + W\alpha = B_0 NS I \quad (10)$$

在一脉冲电流流过的短时间间隔  $0 < t < \tau$  内 ( $\tau \ll T_0$ ), 线圈因转动惯量大而来不及偏转, 仅获得一初始角动量  $J(d\alpha/dt)_\tau$ , 其值约为

$$J \int_0^\tau \frac{d^2 \alpha}{dt^2} dt = B_0 NS \int_0^\tau I dt = B_0 NS q$$

积分之后得

$$\left( \frac{d\alpha}{dt} \right)_\tau = \frac{B_0 NS}{J} q$$

这里  $q$  是从 0 到  $\tau$  的瞬间内流过冲击电流计的总电量. 脉冲电流过后, 方程 (10) 右侧变为零, 成了典型的常系数二阶线性常微分方程. 解此方程时, 考虑到  $t = \tau \approx 0$  时的初始条件  $\alpha|_{t=0} = 0$  和  $d\alpha/dt|_{t=0} = (B_0 NS/J)q$ , 阻尼系数只跟冲击电流计的结构以及回路的总电阻  $R$  有关,  $\rho$  有一定值. 由该方程可得到阻尼运动表达式, 进而可得出最大偏转角  $\alpha_m$  与  $(B_0 NS/J)q$  成正比的结论. 由于光标的偏移量  $d$  和转角  $\alpha_m$  成线性关系 (当  $\alpha_m$  不大时), 故有

$$d = kq$$

比例系数  $k$  和冲击电流计回路的总电阻  $R$  有关, 因为  $R$  决定着电磁阻尼, 进而

决定了阻尼系数  $\rho$  的大小. 在标定和测量时应使  $R$  保持不变. 冲击电流计的三种阻尼运动状态的曲线见图 6-7. 一般使用时都让电流计工作在稍欠阻尼的状态, 即外电路电阻稍大于外临界电阻.

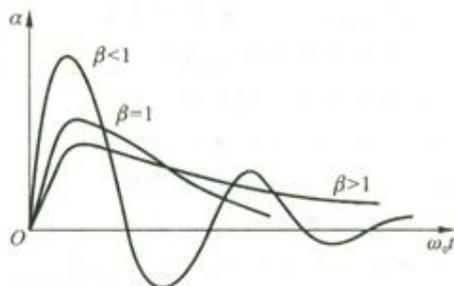


图 6-7 冲击电流计的运动曲线

实验装置中已考虑到了这一点, 即冲击电流计内已串接了一个定值电阻. 和灵敏电流计相比, 冲击电流计的  $k$  值随回路电阻  $R$  的增加而增加, 即一定的脉冲电量  $q$  流过后,  $R$  愈大, 偏转愈大, 而灵敏电流计的电流分度值是一不变的常数. 为了提高冲击法测量的灵敏度, 还可采用在从 0 到  $\tau$  的冲击电流流过期间让  $R$  较小, 以增大  $q$ ,  $t > \tau$  时让  $R = \infty$ , 以增大偏转的实验方法. 在线圈到达最大偏转  $\alpha_m$  时, 线圈系统的弹性势能只是其初始转动动能的一部分, 因为另一部分动能已由阻尼作用而消耗掉了. 例如: 临界阻尼时最大偏转的弹性势能只是初始动能的  $1/e$ .

### 创新园地

螺线管轴上的磁场分布能否用通过低频低压交变电流的方法测定? 为什么? 如欲用交变电流测定, 图 6-5 中的仪器和线路应作哪些改变? 试绘出测量电路的示意图, 并加以说明.

## 实验七 霍耳效应法测量磁感应强度

早在 1879 年, 霍耳<sup>①</sup>在研究载导体在磁场中所受力的性质时发现: 把一半导体放在磁场中(如图 7-1), 如果在  $x$  方向通以电流  $I$ ,  $z$  方向加以磁场  $B$

<sup>①</sup> 霍耳(1855—1938) 美国物理学家. 1880 年获哲学博士学位, 1881 年起在哈佛大学任教, 1895 年起任教授, 是美国科学艺术研究院院士. 霍耳主要研究导体(特别是软铁)的热电效应、电磁效应和热磁效应. 主要著作有《恒定电流的磁力新效应》.

## 实验八 牛顿环实验

$U_1$ 、 $U_2$ 、 $U_3$ 、 $U_4$  是在相同电流条件下,不同电流方向或磁场方向时的霍尔元件的输出电压.这样做的目的是为了消除各种负效应带来的干扰.

### 创新园地

图 7-5 为用霍尔效应测磁场的参考电路图.请编制出测绘  $U_H - I$  特性曲线的操作程序,并在现场测出霍尔器件的导电类型.

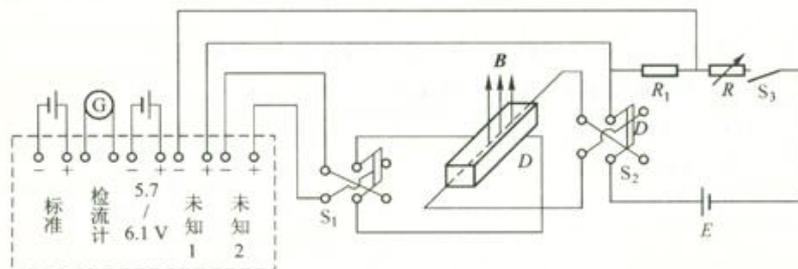


图 7-5 测  $U_H - I$  特性曲线电路图

## 实验八 牛顿环实验

“牛顿环”是一种用分振幅方法实现的等厚干涉现象,最早为牛顿所发现.为了研究薄膜的颜色,牛顿曾经仔细研究过凸透镜和平面玻璃组成的实验装置.他的最有价值的成果是,发现通过测量同心圆的半径就可算出凸透镜和平面玻璃板之间对应位置空气层的厚度.对应于亮环的空气层厚度与 1、3、5、…成比例,对应于暗环的空气层厚度与 0、2、4、…成比例.牛顿环实验装置十分简单,但在物理学发展史上却放射着灿烂的光芒.物理学家们利用这一装置,做了大量卓有成效的研究工作,推动了光学理论特别是波动理论的建立和发展;杨氏利用这一装置验证了相位跃变理论;阿喇戈通过检验牛顿环的偏振状态,对微粒说理论提出了质疑;斐索用牛顿环装置测定了钠双线的波长差,从而推断钠黄光具有两个强度近乎相等的分量.本实验要求学生了解等厚干涉的特点,学会用牛顿环装置测透镜曲率半径,熟悉读数显微镜的使用方法,学习用逐差法处理实验数据.

### 实验原理

牛顿环装置是由一块曲率半径较大的平凸玻璃透镜,以其凸面放在一块光学玻璃平板(平晶)上构成的,如图 8-1 所示.平凸透镜的凸面与玻璃平板之间的空气层厚度从中心到边缘逐渐增加,若以平行单色光垂直照射到牛顿环上,则

经空气层上、下表面反射的两光束存在光程差,它们在平凸透镜的凸面相遇后,将发生干涉.从透镜上看到的干涉花样是以玻璃接触点为中心的一系列明暗相间的圆环,称为牛顿环.

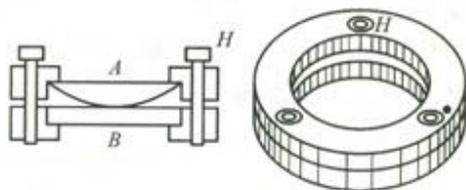


图 8-1 牛顿环器件

一束单色光垂直照射在透明薄膜上,薄膜上、下表面反射的两束光满足相干条件,产生干涉.厚度相同对应同一级次的干涉条纹,故称为等厚干涉.

当一束单色光垂直照射时,在薄膜上、下表面的两束光的光程差满足下式

$$\delta = 2nd + \frac{\lambda}{2} = \begin{cases} 2k \cdot \frac{\lambda}{2}; & k = 1, 2, 3, \dots, \text{明条纹} \\ (2k + 1) \frac{\lambda}{2}; & k = 0, 1, 2, 3, \dots, \text{暗条纹} \end{cases} \quad (1)$$

等号左边  $\frac{\lambda}{2}$  项是由半波损失所引起的光程差.干涉条纹的级次与厚度  $d$  有关,而空气膜的等厚线是以  $O$  为中心的同心圆,所以牛顿环的干涉条纹也是以  $O$  为中心的明暗相间、内疏外密的同心圆环,如图 8-2(a) 所示.

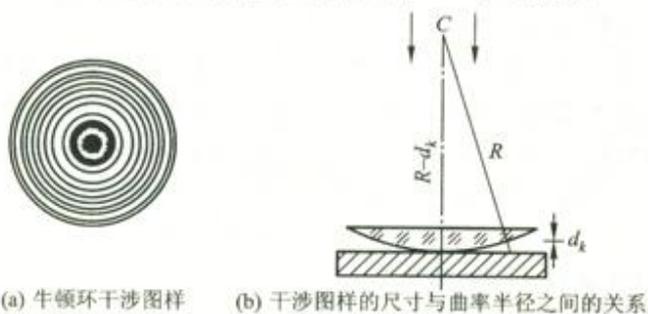


图 8-2 等厚干涉示意图

干涉环半径  $r_k$  处膜的厚度  $d_k$  与平凸透镜的曲率半径  $R$  之间的关系,由图 8-2(b) 可知

$$R^2 = r_k^2 + (R - d_k)^2 \quad (2)$$

因为  $R \gg d_k$ , 所以式(2)可化简为

$$d_k = \frac{r_k^2}{2R} \quad (3)$$

将式(3)代入式(1),并认为空气折射率  $n=1$ ,则

$$r_k^2 = kR\lambda \quad (4)$$

由于玻璃表面的缺陷、受力变形及尘埃混入等因素的影响,使牛顿环和平板玻璃的接触处不是严格的一个点,而是一个圆面,故中心暗纹也不是一个点而是一个圆斑.因此,干涉环的中心不易测准,从而影响了半径  $r_k$  的准确测量.为了减小这一误差,实验中通常测量暗环的直径  $D_k$ ,式(4)可写成

$$D_k^2 = 4kR\lambda \quad (5)$$

另一方面,读数显微镜的系统误差也对  $D_k$  的读数有一定影响.为减小这一影响,我们在实验中通常采用逐差法.具体是,测量第  $m$  环和第  $n$  环的直径  $D_m$ 、 $D_n$ ,由式(5)有

$$R = \frac{D_m^2 - D_n^2}{4(m-n)\lambda} \quad (6)$$

在实验中,如单色光的波长已知,则可用此法测出透镜曲率半径  $R$ ;反之亦然.

## 仪器介绍

### 读数显微镜

#### 1. 读数显微镜测量长度原理

显微镜是观察细微物体的光学仪器,当被测物长度很小或由于某些原因实验者无法用测量仪器直接接触待测物体时,可借助于读数显微镜测物长.

显微镜主要由物镜和目镜组成,它们的组合具有放大作用,当物体被放到载物台上后,经物镜放大成实像落在目镜的焦距以内,再经过目镜放大为虚像映入观察者眼中,然后把待测对象与标准米尺、长度规或精密测微丝杆等进行比较,测量出结果.

#### 2. 读数显微镜的调节和使用

读数显微镜的型号很多,但基本结构都类同.用读数显微镜测微小长度有两种方式,一种为在视场中直接读数,视场中的分划板平面已有刻线,它把被测物体成像到视场分划板平面上,即可测出长度.另一种是把显微成像与螺旋测微螺杆菌结合到一起读数.图8-3属于后一种.

#### 3. 使用读数显微镜的一般步骤

1) 把待测物放置于显微镜载物台上.

2) 调节目镜,使目镜内分划板平面上的十字叉丝清晰,并且转动目镜使十字叉丝中的一条线与刻度尺垂直.

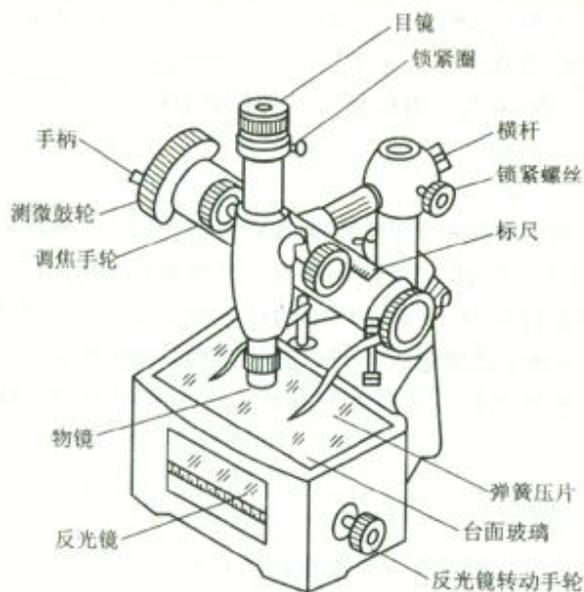


图 8-3 读数显微镜

3) 调节显微镜镜筒,使它与待测物靠近,然后再调节显微镜的焦距,能在视场中看到清晰物像,并清除视差,即眼睛左右移动时,叉丝与物像间无相对位移。

4) 转动测微鼓轮,使叉丝分别与待测物体的两端对准,记下两次读数值  $x_1$ 、 $x_2$ ,其差值的绝对值即为待测物长度  $L$ ,表示为:  $L = |x_2 - x_1|$ 。

### 实验任务

1. 调节牛顿环装置系统,定性观察牛顿环图样特点,把干涉图样调到最佳。
2. 测量平凸透镜曲率半径。

### 实验方法

1. 按图 8-4 放置读数显微镜和牛顿环。用钠光灯垂直照射,经  $45^\circ$  反射镜反射到牛顿环器件上,观察牛顿环干涉图样。调节显微镜,使条纹清晰。

2. 将叉丝对准中央暗纹后,朝一个方向转动显微镜鼓轮,使镜筒朝左方移动,并依次数出暗纹级次(中央为零级)。直数到 18 级,反向旋转鼓轮,使镜筒向右移动。当叉丝对准第 17 级暗纹时,记下干涉圆环左侧的游标读数  $X_{17}$ 。继续移动显微镜筒,分别记下  $X_{16}, X_{15}, \dots, X_{10}$  共 8 级暗纹。然后,沿同一方向移动镜

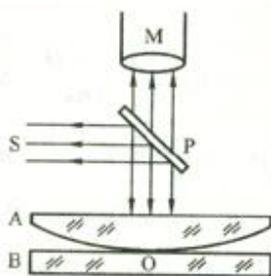


图 8-4 牛顿环光路示意图

筒,使镜筒扫过中央暗纹,测量干涉圆环右侧的暗纹位置.继续使镜筒经过中央暗纹,数至第 10 级,依次记下  $X'_{10}, X'_{11}, \dots, X'_{17}$ . 上述测量过程保证了显微镜朝同一方向运动读出示值,避免了由机械原因引起的空程差.

### 注意事项

1. 调节显微镜的焦距时,应使物镜筒从待测物移开,使物镜筒自下而上地调节. 严禁将镜筒反向调节,以免碰伤和损坏物镜和待测物.
2. 在整个测量过程中,十字叉丝中的一条线必须与主尺平行,十字叉丝走向应与待测物的两个位置连线平行,同时不要将待测物移动.
3. 测量中的测微鼓轮只能向一个方向转动,以防止因螺纹中的空程而引起的误差.

### 数据处理示例

下面是用逐差法求平凸透镜曲率半径的数据处理示例.

表 1 干涉圆环的尺寸

单位:mm

$k$	17	16	15	14	13	12	11	10
$x$	21.073	21.170	21.252	21.340	21.446	21.547	21.645	21.722
$x'$	27.290	27.218	27.130	27.060	26.955	26.860	26.764	26.656
$D_k$	6.207	6.048	5.878	5.720	5.509	5.313	5.119	4.934
$D_k^2$	38.651	36.578	34.551	32.718	30.349	28.228	26.204	24.344

将  $k = 10 \sim 13$  作为第一组,  $k = 14 \sim 17$  作为第二组,其中  $m$  分别为 17, 16, 15, 14,  $n$  分别为 13, 12, 11, 10. 而  $m - n = 4$ . 代入  $R = \frac{D_m^2 - D_n^2}{4(m - n)\lambda}$  中,分别为

$$R_1 = \frac{D_{17}^2 - D_{13}^2}{16\lambda}, R_2 = \frac{D_{16}^2 - D_{12}^2}{16\lambda}, R_3 = \frac{D_{15}^2 - D_{11}^2}{16\lambda}, R_4 = \frac{D_{14}^2 - D_{10}^2}{16\lambda}$$

式中  $\lambda = 589.3 \times 10^{-6} \text{ mm}$ . 将表 1 中数据代入,分别得到

$$R_1 = 880.0 \text{ mm}, R_2 = 885.6 \text{ mm}, R_3 = 885.3 \text{ mm}, R_4 = 888.2 \text{ mm}$$

取平均值

$$\bar{R} = 884.8 \text{ mm}$$

## 阅读材料

## 1. 光学元件表面曲率半径的测量

球面零件加工时,曲率半径的准确度是靠光学样板保证的,光学样板是精密的光学计量器具.本实验中被测量的平凸透镜便可作球面光学样板.球面光学样板按其曲率半径的大小可分为六组:0.5~5、5~10、10~35、35~350、350~1 000、1 000~40 000(mm).测量曲率半径的方法除牛顿环法外,还有实验一中提到的百分表法和球径仪法.为了提高准确度还可以选择自准直显微镜法、自准直望远镜法和刀口阴影法.后两种方法只适合测量曲率半径大于1米的光学样板.牛顿环干涉法的主要优点是能同时检验表面面形的局部误差,可以使用通用仪器能实现无接触测量,样板无磨损,缺点是球面必须抛光,不能测量较小的曲率半径.

## 2. 简单介绍自准直显微镜法测球面曲率半径的原理

图8-5是测量原理图.图中 $s$ 是显微镜的工作距离.被测零件和自准直显微镜设置在轴向位置可以相对调节的工作台上,由精密测长机构可以读出两者之间的距离.首先调节到这样的距离:使由显微镜物镜射出的会聚光束交点正好与被测球面的球心重合,如图8-5(a)所示,此时光束按原路返回,在显微镜中可清晰地看到分划板的自准直像,记下位置读数后,改变相对位置,直到会聚光束交点正好位于被测球面的顶点,如图8-5(b)所示,此时,在显微镜中又一次清晰地看到分划板的自准直像,记下又一次位置读数.两次读数之差就是被测球面的曲率半径.这个方法的优点是测量准确度高,能测小曲率半径的球面,缺点是测量中调节比较麻烦.自准直望远镜法能测量大曲率半径,准确度较低;刀口阴影法测量准确度高,但只能测凹球面镜,对工作台的抗震要求较高.

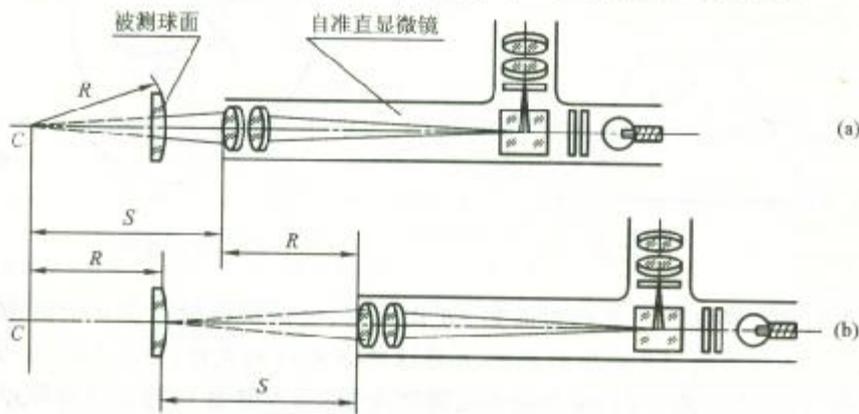


图8-5 自准直显微镜测量曲率半径原理图

## 实验二十二 拉伸法测金属杨氏模量

误差。

表 1 混合法测比热容数据记录表

$m_1/\text{kg}$	$m_1'/\text{kg}$	$m_2/\text{kg}$	$\theta_1/^\circ\text{C}$	$\theta_2/^\circ\text{C}$	$\theta/^\circ\text{C}$	$c/(\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$

铜的比热容  $c_1 = 0.385 \times 10^3 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ , 水的比热容  $c_2 = 4.187 \times 10^3 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

### 注意事项

1. 温度计容易碰碎,在揭开和盖上绝热盖时,都要先把温度计妥善放好。
2. 实验过程中,把待测样品迅速放入量热器和进行搅拌时,不要使水溅出。
3. 实验时应揩干量热器的筒壁。

### 思考题

1. 用混合法测量比热容的理论根据是什么?
2. 为了符合热平衡原理,实验中应注意哪几点?
3. 本实验中哪些是已知量? 哪些是可测量?
4. 估算一下,如何做到  $(\theta_0 - \theta_2) \approx (\theta - \theta_0)$ .  $\theta_0$  为环境温度,  $\theta_2$  为水及量热器内筒的系统初温,  $\theta$  为混合温度. 如  $m_0 = 190 \text{ g}$ ,  $m_1 = 177 \text{ g}$ ,  $c_0 = 4.187 \times 10^3 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ,  $c_1 = 0.394 \times 10^3 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ,  $m = 350 \text{ g}$ ,  $c$  估计为  $0.385 \times 10^3 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ . 假设  $\theta_0 = 22^\circ\text{C}$ ,  $\theta_1 = 100^\circ\text{C}$ , 则水的初温大约为  $17^\circ\text{C}$ , 你是怎样估算的? (提示:根据  $\theta_0 - \theta_2 = \theta - \theta_0$ ,  $\theta = 2\theta_0 - \theta_2$  代入式(3)中求  $\theta_2$ .)

## 实验二十二 拉伸法测金属杨氏模量

杨氏<sup>①</sup>模量是工程材料的重要参数,它是描述材料刚性特征的物理量. 杨氏模量越大,越不易发生变形,杨氏模量可以用动态法来测量,也可以用静态法来测量. 本实验采用静态法. 对于静态法来说,既可以用金属丝的伸长与外力的关系来测出杨氏模量,也可以用金属梁的弯曲与外力的关系来测出杨氏模量. 静态

<sup>①</sup> 杨氏(1773—1829) 英国科学家,波动光学的创始人之一,伦敦皇家学会会员(1794),巴黎科学院院士. 从事光学、声学、热学、力学、数学、天文学、地球物理、哲学、动物学方面的研究,最早提出和证明了声波和光波的干涉现象,并用光的干涉原理解释了牛顿环现象. 最早提出了“能”的概念和“三原色”理论,还于1807年提出了表征弹性体的量——杨氏模量.

法的关键是要准确测出试件的微小变形。

### 实验原理

根据胡克定律,杆状材料在弹性范围内,应力  $\sigma$  与应变  $\varepsilon$  成正比

$$\sigma = E\varepsilon$$

或者写成

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (1)$$

$E$  是比例系数,称为杨氏模量,单位是 Pa,  $1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2$ 。

若金属丝原长为  $l$ ,截面积为  $S = \frac{1}{4}\pi d^2$ ,在拉力  $\Delta F$  作用下,伸长  $\Delta l$ ,则应力

$$\sigma = \frac{\Delta F}{S} = \frac{4\Delta F}{\pi d^2} \quad (2)$$

应变

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} \quad (3)$$

将式(2)、(3)代入式(1),得

$$E = \frac{4\Delta Fl}{\pi d^2 \Delta l} \quad (4)$$

(4)式中, $\Delta F$ 、 $l$ 、 $d$  都比较容易测量,唯有  $\Delta l$  因十分微小,不易测量准确。比如一根直径  $0.8 \text{ mm}$  的钢丝,在  $1 \text{ N}$  力的作用下,伸长不到  $0.01 \text{ mm}$ ,为了能准确测量这样微小的伸长量,必须采用一些特殊的方法。可以采用 CCD 系统(CCD 摄像机和监视器系统),钢丝的伸长量可以在监视器上直接显示出来;也可以采用百分表系统,钢丝的伸长量可在度盘上显示出来;还可以采用光杠杆系统,将微小伸长量放大后再测该长度。第一种方法既直观又准确,但设备投资较大;第二种方法投资省,但准确性难以保证;第三种方法投资不大,测量准确度也比较高。

光杠杆的主要部件有平面镜、T 型支架及前支脚与后支脚。图 22-1(a) 是光杠杆的示意图。平面镜的仰角可调,支脚与支架连成一体,前支脚其形状似一劈尖,后支脚其形状似一钢钉。若将前后支脚均匀地压在水平放置的白纸上,其压痕如图

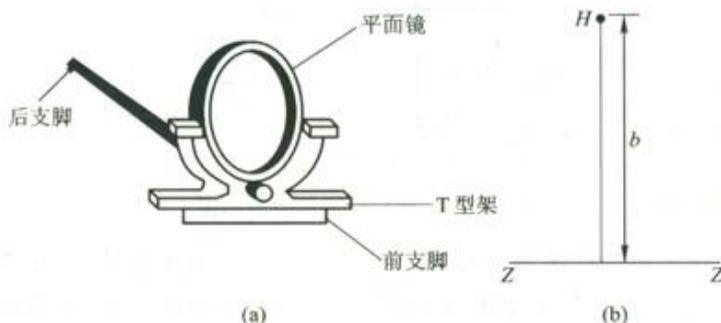


图 22-1 光杠杆

22-1(b)所示. 前支脚压痕  $Z$  是一条直线, 后支脚的压痕  $H$  是一个点, 二者的垂直距离为  $b$ , 称为光杠杆常数,  $b$  的长短决定了光杠杆的测量灵敏度.

光杠杆与被测金属丝的位置关系如图 22-2(a) 所示.

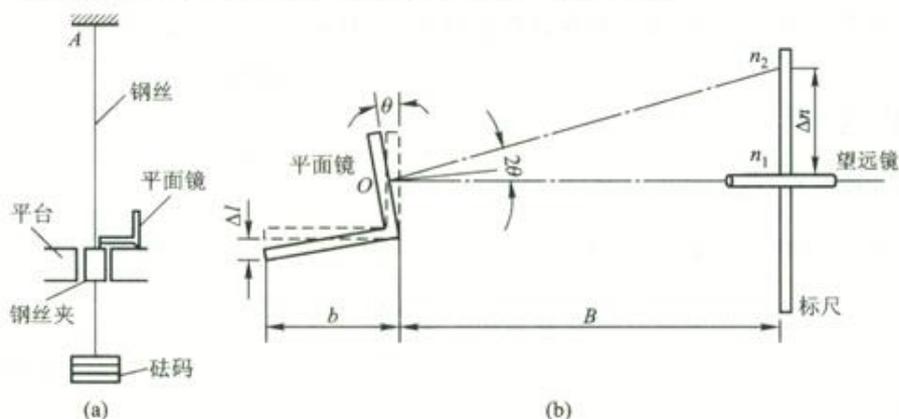


图 22-2 杨氏模量测量装置示意图

被测钢丝顶端固定在  $A$  点, 下端挂有砝码盘, 盘上最多可装载 10 个千克砝码. 钢丝中部的适当部位被钢丝夹夹紧. 小平台固定于支架上, 平台的适当部位开一圆孔, 钢丝夹可在圆孔中无摩擦地移动. 光杠杆的前支脚放置在小平台上, 后支脚置于钢丝夹的上端面. 这样, 当钢丝伸长时, 钢丝夹下落, 后支脚也随之下落, 平面镜的仰角将会改变. 由图 22-2(a) 可分析出钢丝受拉伸后, 平面镜的仰角是怎样改变的. 图 22-2(b) 是光杠杆系统测微原理图. 望远镜固定在一个立柱上 (立柱未画出), 紧贴立柱有一标尺, 标尺在平面镜中成一虚像, 测量时从望远镜中应能瞄准这一标尺像, 如图 22-3, 并能清晰读出标尺像上刻度值.

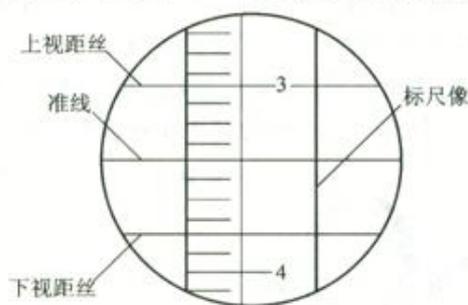


图 22-3 望远镜视场中的图像

测量前调平面镜仰俯角, 使其法线水平, 并与望远镜光轴平行. 再调望远镜的目镜, 看清分划板上的十字准线和上下视距丝, 然后调物镜, 看清标尺像的刻度值, 这时目镜视场中的图像如图 22-3 所示, 标尺读数以水平准线为基准. 设

钢丝未伸长时,标尺读数为  $n_1$ , 钢丝伸长  $\Delta l$  时, 钢丝夹下降  $\Delta l$ , 平面镜的法线偏转  $\theta$  角, 视场中标尺像随之“向下移动”, 读数变为  $n_2$ , 刻度值的变化为  $\Delta n = n_2 - n_1$ ,  $\Delta n$  的大小与  $\Delta l$  有关, 当  $\Delta l \ll b$  时, 有

$$\frac{\Delta l}{b} = \frac{\frac{\Delta n}{2}}{B} = \frac{\Delta n}{2B}$$

所以

$$\Delta l = \frac{b}{2B} \cdot \Delta n \quad (5)$$

式(5)中  $\frac{2B}{b}$  称为光杠杆的放大倍率. 将式(5)代入式(4), 得

$$E = \frac{8lB}{\pi d^2 b} \cdot \frac{\Delta F}{\Delta n}$$

又  $F = mg$ , 所以  $\Delta F = g \cdot \Delta m$ , 代入上式, 得

$$E = \frac{8lBg}{\pi d^2 b} \cdot \frac{\Delta m}{\Delta n} \quad (6)$$

### 仪器介绍

本实验的主要仪器有光杠杆, 带小平台的立柱、带钢丝夹和砝码盘的被测钢丝、游标卡尺、千分尺、望远镜及标尺. 下面主要介绍望远镜和标尺的使用方法.

望远镜的结构、调节和使用方法请参阅实验九(或实验二十), 该实验中的望远镜是分光计的一部分, 主要用来观测谱线, 这些谱线是由来自无穷远的平行光线会聚到望远镜的分划板上. 本实验中的望远镜是用来观测有限远的物体, 这个被观测物体实际上是标尺在光杠杆面镜中所成的虚像. 假如标尺距平面镜的距离为  $B$ , 则标尺像到标尺的距离为  $2B$ . 在正常安装的情况下, 标尺平面应与望远镜的分划板共面. 所以, 用望远镜瞄准标尺像时, 应调焦到  $2B$  远的距离上.

另外, 标尺像是实物的倒像, 所以在望远镜视场中看到的刻度数字是“反写”的, 读数时应注意.

### 实验任务

1. 调节光学系统, 使处于正常工作状态.
2. 测出钢丝随负载的变化率  $\frac{\Delta m}{\Delta n}$ .
3. 将有关参量代入式(6), 求出杨氏模量.

## 实验方法

### 1. 选择测量工具

在式(6)中,  $l$  和  $B$  用卷尺,  $d$  用千分尺,  $b$  用游标卡尺测量,  $\Delta m$  用标准砝码,  $\Delta n$  用尺读望远镜测量. 前四个量是直接测量, 后两个量是双变量测量, 目的是求  $m$  对  $n$  的变化率. 根据上述测量内容绘制数据表.

### 2. 根据几何光学的原理来调节望远镜、光杠杆和标尺之间的位置关系.

1) 望远镜、平面镜、标尺的位置关系要仔细调节, 使标尺在平面镜中的像处在望远镜的视场中, 以便能在望远镜中看到标尺的像.

2) 望远镜的光轴与平面镜的法线平行, 标尺平面要竖直.

### 3. 望远镜的调节

1) 调节目镜, 看清分划板.

2) 调节物镜, 使“目标”成像在分划板上, 这里的“目标”是指什么?

4. 在砝码盘上加载, 测  $m$  与  $n$  的对应关系.

## 注意事项

1. 加砝码, 测出  $n$  随  $m$  的变化. 然后减砝码, 测出对应同一  $m$  的  $n'$  值,  $n$  与  $n'$  有可能不同, 取二者的平均值即可. 采用正反向测量取平均的办法是为了消除弹性形变的滞后效应带来的系统误差. 测量之前, 砝码盘上要加上适当的砝码, 把钢丝拉直.

2. 加减砝码要轻拿轻放, 钢丝的晃动容易使光杠杆的位置发生变化.

## 数据处理示例

本实验被测量共有五个, 分别是  $l, B, d, b$  和  $\Delta n$  ( $\Delta m$  不确定度可忽略), 总误差应该包含五项误差分量, 写成相对不确定度形式

$$\frac{U_E}{E} = \sqrt{\left(\frac{u_l}{l}\right)^2 + \left(\frac{u_B}{B}\right)^2 + \left(\frac{u_d}{d}\right)^2 + \left(\frac{u_b}{b}\right)^2 + \left(\frac{u_{\Delta n}}{\Delta n}\right)^2} \quad (7)$$

为了减小不确定度, 关键之一是准确求出斜率. 按式(7)可以预计,  $\Delta n$  的误差是主要误差项.  $\Delta n$  误差过大, 必然导致斜率  $\left(\frac{\Delta m}{\Delta n}\right)$  的误差增大. 求斜率有两种方法, 其一是逐差法, 其二是作图法. 作图法是以  $n$  为横坐标, 以  $m$  为纵坐标, 描点作图线, 该图线的斜率即是  $\frac{\Delta m}{\Delta n}$ .

表1 实验装置常数测量数据

次数 待测量	1	2	3	4	5	$\bar{X}$	$u_A$	$u_B$	$u_{\bar{X}}$
$B/\text{mm}$	1 600.0	1 599.9	1 599.9	1 600.0	1 599.9	1 599.94	0.024 5	0.289	0.29
$l/\text{mm}$	671.5	672.0	671.5	671.3	671.3	671.52	0.128	0.289	0.32
$d/\text{mm}$	0.715	0.712	0.709	0.718	0.712	0.713 2	0.001 53	0.002 31	0.002 8
$b/\text{mm}$	77.54	77.54	77.56	77.56	77.72	77.584	0.034 3	0.011 6	0.036

表2 钢丝受外力后伸长量的测量

次数	$m/\text{kg}$	$n_+/ \text{mm}$	$n_- / \text{mm}$	$\bar{n} / \text{mm}$	$(n_{i+4} - n_i) / \text{mm}$
1	2.000	39.1	39.5	39.3	$\Delta n_1 = 14.95$
2	3.000	43.1	43.2	43.15	
3	4.000	47.0	47.1	47.05	$\Delta n_2 = 14.85$
4	5.000	50.5	50.9	50.7	
5	6.000	54.2	54.3	54.25	$\Delta n_3 = 14.5$
6	7.000	58.0	58.0	58.0	
7	8.000	61.5	61.6	61.55	$\Delta n_4 = 14.3$
8	9.000	65.0	65.0	65.0	

测量之前在砝码盘上加上 2.000 kg 砝码,将钢丝拉直,然后进行测量.

$$\Delta \bar{n} = \frac{\Delta n_1 + \Delta n_2 + \Delta n_3 + \Delta n_4}{4} = \frac{14.95 + 14.85 + 14.5 + 14.3}{4} = 14.65 \text{ mm}$$

$$\Delta m = 4.000 \text{ kg}$$

$\frac{\Delta m}{\Delta n}$  的不确定度可按以下方法计算. 由于  $\Delta m$  的不确定度可略, 所以其不确定度主要取决于  $\Delta \bar{n}$  的不确定度.  $\Delta \bar{n}$  的 A 类不确定度  $u_A = S(\Delta \bar{n})$ , 而

$$S(\Delta \bar{n}) = \sqrt{\frac{(\Delta n_1 - \Delta \bar{n})^2 + (\Delta n_2 - \Delta \bar{n})^2 + (\Delta n_3 - \Delta \bar{n})^2 + (\Delta n_4 - \Delta \bar{n})^2}{4(4-1)}}$$

$$= 0.151 4$$

$$u_A = S(\Delta \bar{n}) = 0.151 4$$

$$u_B = \frac{\Delta m}{\sqrt{3}} = 0.057 7$$

$$u_{\Delta \bar{n}} = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} = \sqrt{(0.151 4)^2 + (0.057 7)^2} = 0.15$$

$$E = \frac{8lBg}{\pi d^2 b} \frac{\Delta m}{\Delta n} = \frac{8 \times 671.52 \times 10^{-3} \times 1599.94 \times 10^{-3} \times 9.8 \times 4.000}{3.14 \times (0.7132 \times 10^{-3})^2 \times 77.584 \times 10^{-3} \times 14.65 \times 10^{-3}}$$

$$= 1.856 \times 10^{11}$$

根据  $E$  的不确定度传递公式可知:

$$\frac{u_c(\bar{E})}{\bar{E}} = \sqrt{\left(\frac{u_l}{l}\right)^2 + \left(\frac{u_B}{B}\right)^2 + \left(\frac{2u_d}{d}\right)^2 + \left(\frac{u_b}{b}\right)^2 + \left(\frac{u_{\Delta n}}{\Delta n}\right)^2}$$

$$\frac{u_l}{l} = \frac{0.32}{671.52} = 4.77 \times 10^{-4}$$

$$\frac{u_B}{B} = \frac{0.29}{1599.94} = 1.81 \times 10^{-4}$$

$$\frac{2u_d}{d} = \frac{0.0028 \times 2}{0.7132} = 7.85 \times 10^{-3}$$

$$\frac{u_b}{b} = \frac{0.036}{77.584} = 4.64 \times 10^{-4}$$

$$\frac{u_{\Delta n}}{\Delta n} = \frac{0.15}{14.65} = 0.0102$$

前四项均是微小分量,可忽略.

$$\frac{u_c(\bar{E})}{\bar{E}} = 0.0102$$

扩展相对不确定度为:

$$\frac{U_{\bar{E}}}{\bar{E}} = 2 \frac{u_c(\bar{E})}{\bar{E}} = 0.0204$$

$$U_{\bar{E}} = 1.856 \times 10^{11} \times 0.0204 = 0.04 \times 10^{11}$$

结果表达式为:

$$E = (1.86 \pm 0.04) \times 10^{11} \text{ N/m}^2$$

### 阅读材料

#### 1. 测距望远镜

标尺到平面镜的距离  $B$  也可以用测距望远镜来测量. 测距望远镜的分划板上除刻有十字叉丝作为准线外, 还刻有两条水平线, 一条在水平准线上方叫上视距丝, 另一条在水平准线下方叫下视距丝, 如图 22-3 所示. 测距方法是, 在被测地点树立一根标尺, 用望远镜瞄准它, 并将标尺刻度线清晰地呈现在分划板上. 若上视距丝与标尺刻度  $N_1$  重合, 下视距丝与标尺刻度  $N_2$  重合, 则上下视距丝截取标尺长度为

$$\Delta N = N_2 - N_1$$

这时被测地点到望远镜转轴的距离为

$$x = \frac{f}{p} \cdot \Delta N \quad (8)$$

上式中  $\frac{f}{p}$  为望远镜的视距常数,  $f$  是物镜的焦距,  $p$  是上下视距丝的距离, 大多数测距望远镜  $\frac{f}{p}$  值都是取为 100, 这样式(8)变为

$$x = 100 \cdot \Delta N \quad (9)$$

由式(9)可见, 只要在望远镜中读出  $\Delta N$ , 即可算出距离. 望远镜测距在工程测量中得到了广泛的应用. 目前许多高等院校在杨氏模量测量装置中也配备了测距望远镜, 但这些测距望远镜的“测距”误差较大, 以至于许多学校不得不放弃它的测距功能. 这是为什么呢? 本实验中所使用的望远镜是内调焦式望远镜, 它的光学结构如图 22-4 所示,  $L_1$  是前置物镜,  $L_2$  是内调焦物镜,  $S$  是分划板,  $L_3$  是目镜.  $L_1$  与  $L_2$  组成该望远镜的物镜组, 若  $L_1$  的焦距为  $f_1$ ,  $L_2$  的焦距为  $f_2$ , 二者的光学间隔为  $\Delta$  ( $L_1$  后焦面与  $L_2$  前焦面的垂直距离), 则物镜组的焦距为  $f = \frac{f_1 f_2}{\Delta}$ , 调焦时,  $L_2$  的位置发生变化, 视距常数  $\frac{f}{p}$  也将发生变化, 这样使用式(9)必然带来较大的测量误差. 若被测目标接近无穷远, 则这一误差将大大减小.



图 22-4 内调焦式望远镜光学结构示意图

## 2. CCD 显微成像系统

在对金属丝的拉伸过程中, 若在钢丝夹上刻一细线, 则随着金属丝的微小伸长, 这一细线将微微下移, 用 CCD 显微成像系统可以将这一微小伸长过程放大后用图像显示出来.

CCD 显微系统包括三部分, 如图 22-5 所示.

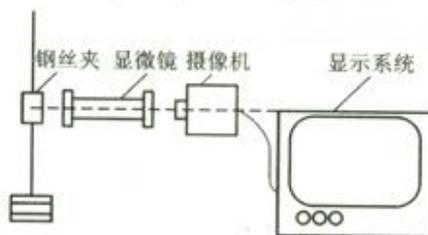


图 22-5 CCD 显微成像示意图

1) 显微镜:用于观测钢丝夹上细线位置的变化,总放大率为 25 倍,测量范围为 7 mm,分度值为 0.05 mm.

2) CCD 摄像机:CCD 器件是图像传感器,它的镜头对准显微镜的分划板,将被测目标图像记录下来.

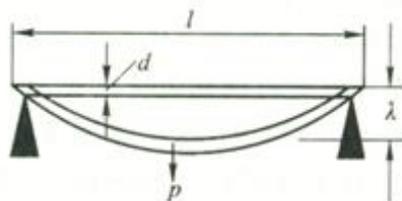
3) 显示系统:显示系统是一台黑白监视器,能将 CCD 拍摄的画面呈现在显示屏上.仔细调节 CCD 的镜头焦距,可以在监视器的屏幕上看到清晰的画面,从而记录下金属丝的微小伸长量.

### 创新园地

1. 望远镜、光杠杆、标尺这一测量系统调节较困难,实际上用一台激光器取代望远镜也可以测量微小伸长量.不仅调节容易,也消除了由于调节不精确带来的系统误差.请你设计出这一测量系统,并推导出测量公式,说明测量方案.

2. 一根长度为  $l$ 、宽为  $b$ 、厚为  $d$  的矩形梁,两自由端放在一对平行、水平、等高的刀口上,梁的中点悬挂一重物,如图 22-6. 若能测出梁的微小变形——挠度  $\lambda$ ,则材料的杨氏模量为

$$E = \frac{pl^3}{4\lambda bd}$$



你认为  $\lambda$  应怎样测量? 画出装置简图,说明图 22-6 弯梁法测杨氏模量示意图测量方案.

3. 拉伸法实验中,随着砝码的增加,金属丝不断的伸长,与此同时在望远镜视场中看到:标尺的“像”是向上移动还是向下移动? 为什么会产生这种现象?

## 第四章 提高性实验

### 实验二十三 动力学共振法测金属杨氏模量

## 第四章 提高性实验

### 实验二十三 动力学共振法测金属杨氏模量

在实验二十二中我们学习了用拉伸法测量杨氏模量的方法,这是最基本的测量方法.本实验学习另一种测量杨氏模量的方法,即将棒状样品用细线悬挂起来,用声学的方法测出它作弯曲振动时的共振频率,由此得到其杨氏模量.与静态拉伸法相区别,本方法又称为动力学共振法.

静态拉伸法由于拉伸时载荷大、加载速度慢、有弛豫过程,不适于对脆性材料的测量,也不易测量材料在不同温度下的杨氏模量.动力学共振法不仅克服了上述缺陷,而且更具实用价值.该方法因其适用范围广、实验结果稳定、误差小而成为广泛采用的测量方法.

#### 实验原理

如图 23-1 所示,一细长棒(长度比横向尺寸大很多)的横振动(又称弯曲振动)满足动力学方程(方程的建立参见本实验的阅读材料)

$$\frac{\partial^2 \eta}{\partial t^2} + \frac{EI}{\rho S} \frac{\partial^4 \eta}{\partial x^4} = 0 \quad (1)$$

棒的轴线沿  $x$  方向,式中  $\eta$  为棒上距左端  $x$  处截面的  $z$  方向位移, $E$  为该棒的杨氏模量, $\rho$  为材料密度, $S$  为棒的横截面积, $I$  为某一截面对棒中心轴线的惯量矩( $I = \iint_S z^2 dS$ ).

用分离变量法求解该方程.令

$$\eta(x, t) = X(x)T(t)$$

代入方程(1)得

$$\frac{1}{X} \frac{d^4 X}{dx^4} = -\frac{\rho S}{EI} \frac{1}{T} \frac{d^2 T}{dt^2}$$

等式两边分别是两个独立变量  $x$  和  $t$  的函数,只有在两端都等于同一任意常数

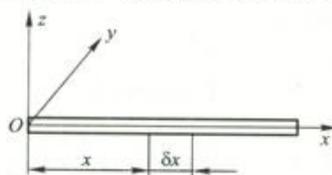


图 23-1 细长棒的弯曲振动

时才可能成立. 设等式两边都等于  $K^4$ , 于是得

$$\begin{cases} \frac{d^4 X}{dx^4} - K^4 X = 0 \\ \frac{d^2 T}{dt^2} + \frac{K^4 EI}{\rho S} T = 0 \end{cases}$$

设棒中每点都作简谐振动, 则此两方程的通解分别为

$$\begin{cases} X(x) = B_1 \operatorname{ch} Kx + B_2 \operatorname{sh} Kx + B_3 \cos Kx + B_4 \sin Kx \\ T(t) = A \cos(\omega t + \varphi) \end{cases}$$

于是横振动方程(1)的通解为

$$\eta(x, t) = (B_1 \operatorname{ch} Kx + B_2 \operatorname{sh} Kx + B_3 \cos Kx + B_4 \sin Kx) A \cos(\omega t + \varphi) \quad (2)$$

式中

$$\omega = \left( \frac{K^4 EI}{\rho S} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

称为频率公式, 它对任意形状截面的试样、不同的边界条件都是成立的. 我们只要根据特定的边界条件定出常数  $K$ , 代入特定截面的惯量矩  $I$ , 就可以得到具体条件下的关系式.

对于长为  $L$ 、两端自由的棒, 当悬线悬挂于棒的节点附近时, 并且棒的两端均处于自由状态, 那么在两端面上, 横向作用力与弯矩均为零. 横向作用力  $F = \frac{\partial M}{\partial x} = -EI \frac{\partial^3 \eta}{\partial x^3}$ , 弯矩  $M = -EI \frac{\partial^2 \eta}{\partial x^2}$ , 则边界条件有 4 个:

$$\left. \frac{d^3 X}{dx^3} \right|_{x=0} = 0, \left. \frac{d^3 X}{dx^3} \right|_{x=L} = 0, \left. \frac{d^2 X}{dx^2} \right|_{x=0} = 0, \left. \frac{d^2 X}{dx^2} \right|_{x=L} = 0$$

从边界条件可以得到, 方程(1)有解的条件是

$$\cos KL \cdot \operatorname{ch} KL = 1 \quad (4)$$

用数值计算法得到方程的根, 依次是

$$K_n L = 0, 4.7300, 7.8532, 10.9956, 14.137, 17.297, \dots$$

其中  $K_0 L = 0$  的根对应于静止状态,  $K_1 L = 4.7300$  对应的振动频率称为基频频率.

棒的横振动节点与振动级次有关, 当  $n$  为第 1, 3, 5, ... 时对应于对称形振动. 当  $n$  为第 2, 4, 6, ... 时对应于反对称形振动. 图 23-2 给出了当  $n = 1, 2, 3, 4$  时的振动波形.

将  $K_1 = \frac{4.7300}{L}$  代入式(3), 得到棒作基频振动的固有频率

$$\omega = \left( \frac{4.730^4 EI}{\rho L^4 S} \right)^{\frac{1}{2}}$$

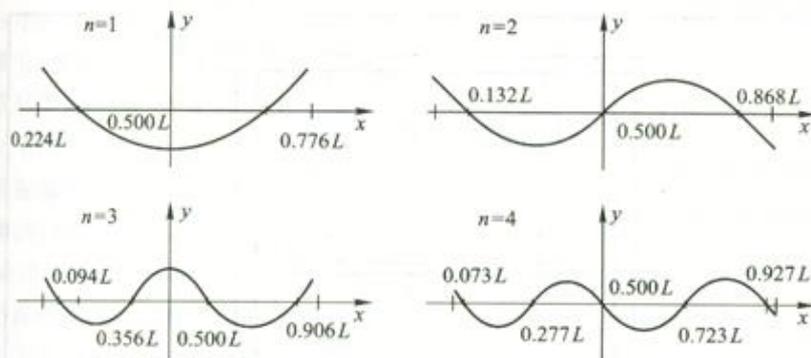


图 23-2 二端自由棒的振动波形

解出杨氏模量

$$E = 1.9978 \times 10^{-3} \frac{\rho L^4 S}{I} \omega^2 = 7.8870 \times 10^{-2} \frac{L^3 m}{I} f^2$$

上式中  $m$  为棒的质量、 $f$  为圆棒的基振频率。对于直径为  $d$  的圆棒, 惯量矩  $I =$

$$\int z^2 dS = \frac{\pi d^4}{64}, \text{ 代入上式得}$$

$$E = 1.6067 \frac{L^3 m}{d^4} f^2 \quad (5)$$

实际测量时, 由于不能满足  $d \ll L$ , 此时式(5)应乘上一修正系数  $T_1$ , 即

$$E = 1.6067 \frac{L^3 m}{d^4} f^2 T_1 \quad (6)$$

$T_1$  可根据  $d/L$  的不同数值和材料的泊松比查表得到。实验中使用的样品是黄铜圆杆,  $d = 5 \text{ mm}$ ,  $L = 200 \text{ mm}$ , 查得  $T_1 = 1.0035$ 。

### 仪器介绍

图 23-3 为实验装置示意图。被测试样用两根细线悬挂在换能器 1、2 下面。换能器 1 是发射换能器, 也称激振器, 信号发生器输出的电信号加在激振器上, 使激振器中的膜片产生同频机械振动, 悬线 3 固定在此膜片中心, 膜片的振动引起悬线跟着上下振动, 激发试样发生振动。试样的振动通过悬线 4 传给换能器 2, 换能器 2 为接收换能器, 又称拾振器, 它将试样的振动转变为同频电信号, 加到示波器的  $Y_1$  端上。信号发生器输出的信号可以同时加到示波器的  $Y_2$  端上。改变信号发生器输出信号的频率, 当其数值与试样棒的某一振动模式的频率一致时发生共振, 这时试样振动振幅最大, 拾振器输出电信号也达到最大。测出此时的信号频率, 若判断它为此样品的基频频率, 代入式(6)即可求得杨氏模量。

下面对实验装置中的几个部分作简要说明。

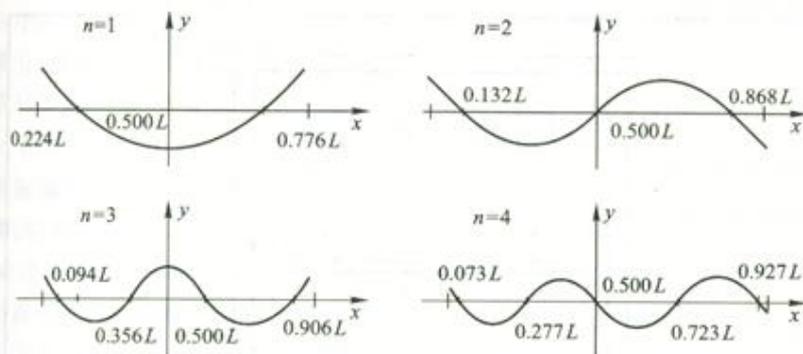


图 23-2 二端自由棒的振动波形

解出杨氏模量

$$E = 1.9978 \times 10^{-3} \frac{\rho L^4 S}{I} \omega^2 = 7.8870 \times 10^{-2} \frac{L^3 m f^2}{I}$$

上式中  $m$  为棒的质量、 $f$  为圆棒的基振频率。对于直径为  $d$  的圆棒, 惯量矩  $I =$

$$\int_V z^2 dS = \frac{\pi d^4}{64}, \text{ 代入上式得}$$

$$E = 1.6067 \frac{L^3 m f^2}{d^4} \quad (5)$$

实际测量时, 由于不能满足  $d \ll L$ , 此时式(5)应乘上一修正系数  $T_1$ , 即

$$E = 1.6067 \frac{L^3 m f^2}{d^4} T_1 \quad (6)$$

$T_1$  可根据  $d/L$  的不同数值和材料的泊松比查表得到。实验中使用的样品是黄铜圆杆,  $d = 5 \text{ mm}$ ,  $L = 200 \text{ mm}$ , 查得  $T_1 = 1.0035$ 。

### 仪器介绍

图 23-3 为实验装置示意图。被测试样用两根细线悬挂在换能器 1、2 下面。换能器 1 是发射换能器, 也称激振器, 信号发生器输出的电信号加在激振器上, 使激振器中的膜片产生同频机械振动, 悬线 3 固定在此膜片中心, 膜片的振动引起悬线跟着上下振动, 激发试样发生振动。试样的振动通过悬线 4 传给换能器 2, 换能器 2 为接收换能器, 又称拾振器, 它将试样的振动转变为同频电信号, 加到示波器的  $Y_1$  端上。信号发生器输出的信号可以同时加到示波器的  $Y_2$  端上。改变信号发生器输出信号的频率, 当其数值与试样棒的某一振动模式的频率一致时发生共振, 这时试样振动振幅最大, 拾振器输出电信号也达到最大。测出此时的信号频率, 若判断它为此样品的基频频率, 代入式(6)即可求得杨氏模量。

下面对实验装置中的几个部分作简要说明。

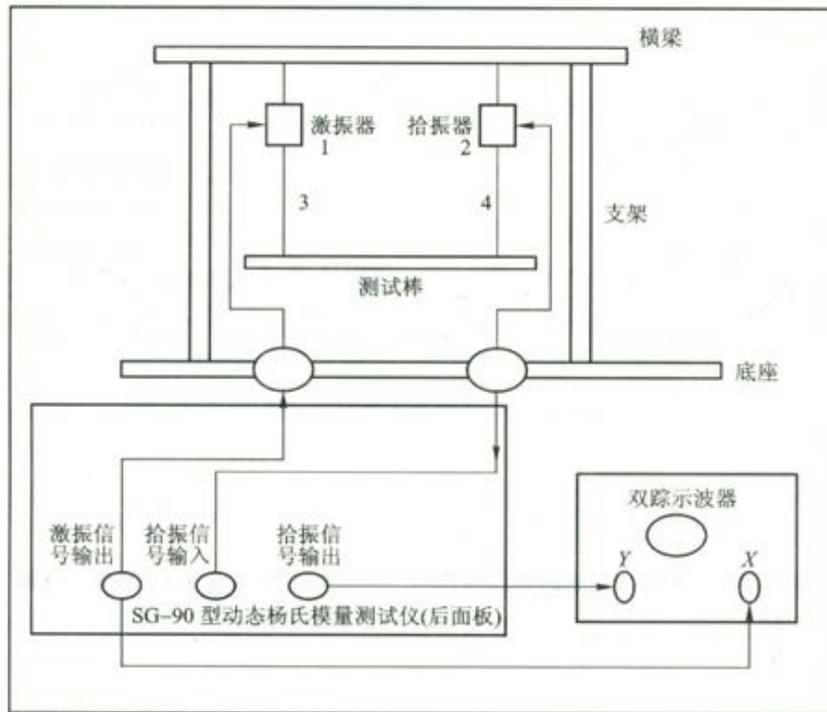


图 23-3 共振法测量金属杨氏模量示意图

### 1. 动态杨氏模量测试仪

其前面板如图 23-4 所示,提供的正弦电压信号的幅值和频率均连续可调,并且直接在仪器上显示出来.测试仪输出的正弦电压信号可直接输入给激振器,也可以同时输入给示波器.测试仪接收由拾振器转化的正弦电压信号,经放大后输送给示波器.信号既可单独显示也可与激振信号合成李萨茹图形显示.

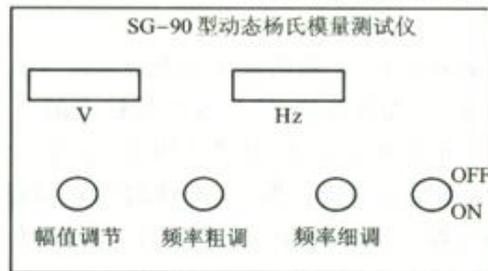


图 23-4 测试仪前面板示意图

### 2. 激振器

激振器为电磁式,内部原理示意图见图 23-5.其中 1 为永久磁铁,2 为杯形铁芯,3 为线圈,4 为膜片,5 为悬线,其上端固定在膜片上.膜片与永久磁铁端面

间有一小间隙,当线圈中通过交变电流时,永久磁铁对膜片的吸引力上叠加了一交变成分,使膜片产生振动.加永久磁铁的目的是为了使膜片的振动频率与线圈中电信号频率一致,否则将出现倍频现象.

### 3. 拾振器

拾振器采用弯曲振动的压电换能器,原理结构如图 23-6.其中 1 为压电陶瓷圆片,它通常用锆钛酸铅作成,在这个陶瓷圆片的上下表面各镀上极薄的银电极 2,经过一定处理(高电压极化)后,就具有了压电效应,即在片上加压力时,片表面出现电荷.电荷的多少、正负随力的大小、方向而变.压电陶瓷用胶粘在圆形薄铜片 3 上,该铜片四周固定,铜片中心固定悬线 4.当挂在悬线上的样品发生振动时,通过悬线,引起铜片中心部位上下振动,因其边缘固定,故铜片是在作鼓膜形弯曲振动.压电陶瓷受到交变应力,因此电极上出现交变电压.

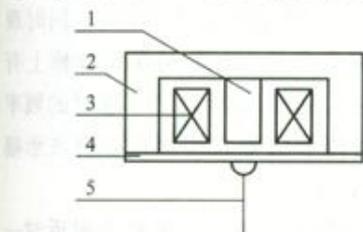


图 23-5 激振器

1. 永久磁铁 2. 杯形铁芯 3. 线圈  
4. 膜片 5. 悬线

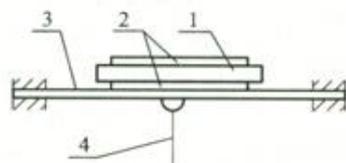


图 23-6 压电弯曲换能器

1 压电陶瓷圆片 2. 银电极 3. 圆形薄铜片  
4. 铜片中心固定悬线

## 实验任务

1. 测量试样的长度  $L$ 、直径  $d$  和质量  $m$ 。
2. 使用示波器直接测量试样的共振频率,计算出杨氏模量。
3. 不断加热试样,测出不同温度下的共振频率及杨氏模量。
4. 作出杨氏模量  $E$  和温度  $T$  的关系曲线。

## 操作提示与提案编写

### 1. 安装试样棒

将试样棒小心地悬挂于两悬丝之上,要求试样棒横向水平,悬丝与试样棒轴向垂直,两悬丝挂点到试样棒端点距离相同,并处于静止状态。

### 2. 连机

测试仪激振信号输出端接激振器的输入端,测试仪拾振信号输入端接拾振器输出端,测试仪拾振信号输出端接示波器的 Y 通道。

### 3. 开机

分别打开示波器、测试仪电源开关.调整示波器处于正常工作状态,适当选取输出衰减大小,调节频率旋钮显示当前输出频率.

#### 4. 鉴频与测量

先将两悬丝置于外 30 mm 处,待试样棒稳定之后,调节信号发生器频率旋钮(在实验室提供的参考频率范围内慢慢调节),寻找试样棒的共振频率.当示波器荧光屏上出现共振现象时,正弦波振幅突然增大,再微调信号发生器的频率旋钮,使波形振幅达到极大值.鉴频就是对试样共振模式及振动级次的鉴别,它是准确测量操作中的重要一步.

在作频率调节的时候,我们会发现试样棒不止在一个频率处发生共振现象,而我们所用公式(6)只适用于基频共振的情况,所以我们要确认试样棒是在基频频率下共振.

可以采用阻尼法来鉴别:若沿试样棒长度的方向轻触棒的不同部位,同时观察示波器,在波节处波幅不变化,而在波腹处波幅会变小.当发现在试样棒上有两个波节时,这时的共振就是在基频频率下的共振,从频率计上记下这时的频率值.若这时正弦信号的振幅太小或太大,可以适当调节信号发生器的正弦波形幅值旋钮或示波器的 Y 轴偏转因数,以使波形大小合适.

在寻找共振点时,调节信号发生器频率要极其缓慢,到了共振频率附近时一般应该用频率微调旋钮调节.调节时还要注意判断假共振信号,激振器、拾振器及整个系统都有自己的共振频率.拾振器的输出会伴随有许多次极大值.当样品棒达到共振时,用手指或手背去触摸样品时会有麻酥感,而且手一碰样品,输出信号会马上小下来.在共振时注意观察发射和接收信号之间的相位关系.

#### 操作中应注意

1. 对悬丝千万不要用力拉,否则将会损坏换能器,甚至将悬丝从膜片上拉掉下来.悬挂样品时,移动悬丝位置时,对悬丝都不要给予冲击力,轻放轻动.
2. 给激振器加正弦信号,幅度限制在 5~6 V 内(峰峰值).
3. 试样棒不可随处乱放,一定要保持其清洁,拿放时应特别小心.
4. 安装试样棒时,应先移动支架到既定位置,然后再悬挂试样棒.
5. 实验时,一定要待试样棒稳定之后才可以正式进行测量.

#### 课堂讨论问题

1. 试讨论  $u_L$ 、 $u_d$ 、 $u_m$ 、 $u_f$  对扩展不确定度的贡献,给出扩展不确定度的表达式.
2. 试讨论悬挂点偏离节点引起的误差,以及炉温分布不均和温度测量不准确引起的误差.

## 阅读材料

## 棒的弯曲振动动力学方程

如图 23-7(a) 所示, 一均匀细棒, 其轴线在  $x$  方向, 图表示棒弯曲变形后的瞬间. 取棒中  $x$  处的一小段  $\delta x$ , 这一小段的两端弯曲变形不相等, 因此两端所受力矩也不相等, 设分别为  $M$  及  $M + \delta M$ . 同时在两端截面上受小段外相邻薄层所给予的切应力  $F$  和  $F + \delta F$ .

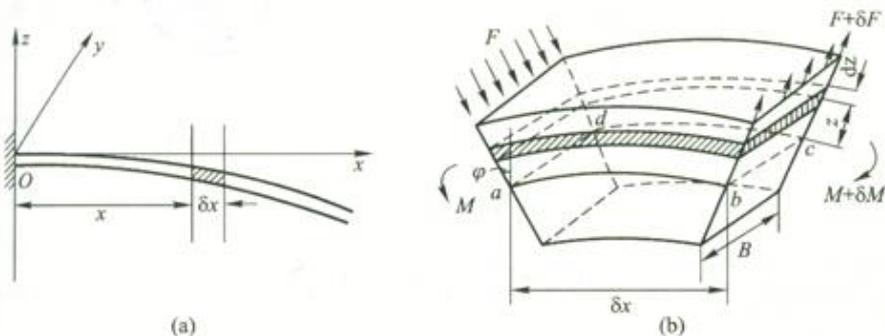


图 23-7 棒的弯曲变形

如图 23-7(b) 所示,  $\delta x$  小段发生形变前,  $abcd$  面处在  $xOy$  平面内, 并和  $z$  轴垂直. 弯曲变形后, 可以认为  $abcd$  只改变了形状(变弯了), 而大小没变, 因此称之为中和面. 与中和面平行的那些面, 除了有弯曲变形外, 其长度也发生了变形, 中和面上面的面介质伸长, 下面的面介质被压缩, 即缩短. 又设, 棒发生弯曲变形时, 棒中各个截面的形状不变, 只是绕  $y$  发生转动, 转角以  $\varphi$  表示.

为了求弯曲力矩和形变位移之间的关系, 再从  $\delta x$  左端切出一小薄层  $\Delta x$ , 如图 23-8(a). 考察  $\Delta x$  中任意一平行于中和面并距离此面为  $z$ , 厚度为  $\delta z$  的薄层, 其宽度仍为  $B$ , 见图 23-8(b), 此薄层的截面积  $ds = B\delta z$ . 根据胡克定律, 作用在薄层左端之面积  $ds$  上的拉伸形变应力为

$$f_1 = E \frac{z\Delta\varphi}{\Delta x}$$

式中,  $E$  为棒材料的弹性模量,  $z\Delta\varphi$  为  $\delta z$  厚的这一长条薄层的伸长量,  $\Delta\varphi$  为  $\Delta x$  两端面的转角之和,  $\Delta x$  为薄条原长. 作用在  $ds$  上的总力为

$$f_1 ds = E \frac{z\Delta\varphi}{\Delta x} ds$$

此力对于以在  $O$  点处的中心线为轴(平行于  $y$  轴)的力矩为

$$dM = f_1 ds \cdot z = E \frac{\Delta\varphi}{\Delta x} z^2 ds$$

对  $\Delta x$  左端整个面积分, 求得作用在这个面上的弯曲力矩为

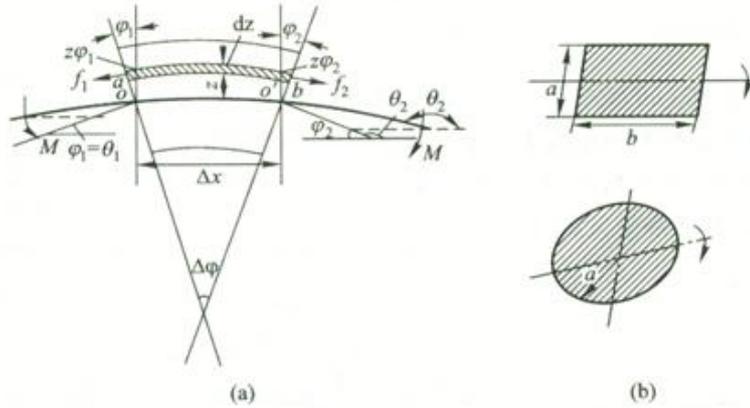


图 23-8 弯曲力矩的分析

$$M = E \frac{\Delta\varphi}{\Delta x} \iint z^2 dz = E \frac{\Delta\varphi}{\Delta x} I \quad (7)$$

式中  $I = \iint z^2 dS$  为截面的惯量矩。

对宽为  $B$ 、高为  $a$  的矩形截面有

$$I = B \int_{-\frac{a}{2}}^{\frac{a}{2}} z^2 dz = \frac{Ba^3}{12}$$

对半径为  $a$  的圆形截面,如图 23-9 所示,有

$$I = \int_{-a}^a 2yz^2 dz = 2 \int_{-a}^a z^2 \sqrt{a^2 - z^2} dz = \frac{\pi a^4}{4}$$

$\Delta\varphi$  是  $\Delta x$  小薄层左右两端面的转角之和。左端面的转角  $\varphi_1$  决定于  $OO'$  线在  $x$  处的切线倾角  $\theta_1$ , 因振动很小,倾角也很小,于是

$$\varphi_1 = \theta_1 \approx \tan \theta_1 = \left( \frac{\partial \eta}{\partial x} \right) \Big|_x$$

$\eta$  为  $o$  点在  $z$  方向的位移。同理  $\Delta x$  的右端面转角

$$\varphi_2 = \pi - \theta_2 \approx \tan(\pi - \theta_2) = -\tan \theta_2 = - \left( \frac{\partial \eta}{\partial x} \right) \Big|_{x+\Delta x}$$

$$\Delta\varphi = \varphi_1 + \varphi_2 = \left( \frac{\partial \eta}{\partial x} \right) \Big|_x - \left( \frac{\partial \eta}{\partial x} \right) \Big|_{x+\Delta x} = - \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\partial \eta}{\partial x} \right) \Delta x = - \frac{\partial^2 \eta}{\partial x^2} \Delta x$$

所以

$$\frac{\Delta\varphi}{\Delta x} = - \frac{\partial^2 \eta}{\partial x^2}$$

代入式(7),得

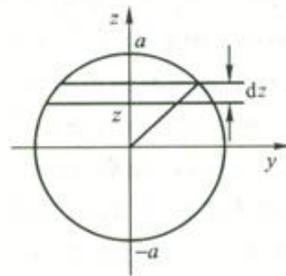


图 23-9 圆形截面

$$M = -EI \frac{\partial^2 \eta}{\partial x^2} \quad (8)$$

考虑到整个棒的弯曲变形均很小,因此可以认为整个  $\delta x$  小段绕  $oy$  轴的转动可以忽略. 则  $\delta x$  所受的总弯曲力矩和切应力产生的力矩相平衡,即

$$(M + \delta M) - M = [(F + \delta F) + F] \frac{\delta x}{2}$$

展开,忽略高级小量,得  $\delta M = F\delta x$ .

当  $\delta x$  极小时

$$F = \frac{\partial M}{\partial x} \quad (9)$$

将式(8)代入式(9),得

$$F = -EI \frac{\partial^3 \eta}{\partial x^3} \quad (10)$$

切应力也是坐标  $x$  的函数, $\delta x$  两端的切应力并不相等,因此作用在  $\delta x$  小段上的净切应力是

$$\delta F = \left( \frac{\partial F}{\partial x} \right) \delta x = -EI \left( \frac{\partial^4 \eta}{\partial x^4} \right) \delta x \quad (11)$$

此力是产生加速度的力,用牛顿第二定律得

$$\delta F = \rho S \delta x \frac{\partial^2 \eta}{\partial t^2}$$

将式(11)代入,得

$$\begin{aligned} \rho S \delta x \frac{\partial^2 \eta}{\partial t^2} &= -EI \frac{\partial^4 \eta}{\partial x^4} \delta x \\ \frac{\partial^2 \eta}{\partial t^2} + \frac{EI}{\rho S} \frac{\partial^4 \eta}{\partial x^4} &= 0 \end{aligned} \quad (12)$$

此即细长棒弯曲振动的动力学方程.

### 创新园地

1. 请用利萨如图形法测出共振频率,从而测出杆状试样的杨氏模量.

提示:把激振器的信号送到示波器的  $Y_2$  输入端,将拾振器的信号送到  $Y_1$  输入端.

2. 请你用外延法测量共振频率,从而测出细杆状样品的杨氏模量.

提示:理论上,样品作基频共振时,悬点应置于节点处,即悬点应置于距棒的两端面分别为  $0.224L$  和  $0.776L$  处.但是,在这种情况下,棒的振动无法被激发.欲激发棒的振动,悬点必须离开节点位置.这与理论条件又不一致,势必产生误差.请你设法求出在节点处的共振频率.可在节点附近取几个点,求

出共振频率,然后分析共振频率值与节点距离的变化规律,可推断出节点处的共振频率。

## 实验二十四 热电偶的定标与测温

在各种科学实验和工程中,经常将一些不易精确测量的非电学量,如压力、位移、速度、温度、时间、浓度、光强等转换为电流、电压、频率、相位等电学量来测量,这是现代测量技术的一个重要特征,具有这种特征的测量技术称为非电量的电测量技术。非电量的电测技术涉及的范围很广,其中利用温差热电偶检测温度就是非电量电测技术的一个重要领域。温差热电偶有着测温范围宽、灵敏度和准确度高、结构简单、不易损坏,并且可以进行动态测量和记录的许多优点,因而被应用于温度的传感、工业加热炉温的测量、金属熔点的测量、数据采集与温度控制、住宅空调热量的测量等诸多方面。

温差电是古老而又年轻的学科,从 20 世纪 30 年代起就开始得到了实际的应用。随着科学技术的不断进步,今天的测温技术已经种类繁多,但是温差电偶仍然在一个相当宽阔的领域被使用着,并且在不断的发展,利用温差电偶的各类技术仍是科学工作者所必须掌握的。

### 实验原理

#### 1. 温差热电偶

当两种不同的金属接触时,它们之间产生的电势差称为接触电势差。接触电势差的大小,不但与金属的种类有关,而且与接触层的温度有关。所有第一类导体即金属,可以排成一个序列,在这个序列中,任何一种金属,若与它后面的金属相接触便带正电,若与它前面的金属相接触便带负电,排列的顺序如下:

+ 铝、锌、锡、镉、铅、铋、铊、汞、铁、铜、银、金、铂、钨 -。

在温度相同的情况下,如果把几种不同的金属依次连接起来,两端的接触电势差只与两端的金属有关,而与中间的金属无关。实验发现如果将这些不同的金属串联起来,并构成闭合回路,则这些金属的接触电势差之和等于零。

当闭合电路中含有电解质或接触点的温度不同时,这些金属的接触电势差之和不等于零,回路中有电流流过,如图 24-1 所示。这表示两种金属的接触处由于温度差而产生了电动势,叫做温差电动势。这种电路称为热电偶,该现象称为塞贝克现象。实验表明,热电偶回路中的温差电动势的大小和两个接

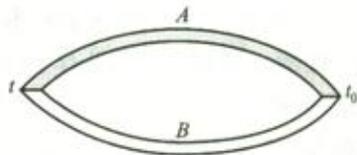


图 24-1 热电偶电路

## 实验三十二 迈克耳逊干涉仪的调节和使用

实验三十二 迈克耳孙干涉仪的调节和使用 241

### 实验三十二 迈克耳孙干涉仪的调节和使用

美国实验物理学家迈克耳孙于 1881 年发明了迈氏干涉仪,并在 1887 年加以改进.迈氏干涉仪在近代物理学的发展史上起过重要的作用.1801 年英国医生托马斯·杨做出了第一个观察光的干涉现象的实验——光的双缝干涉实验,并成功地测出了红光和紫光波长,奠定了光的波动性的实验基础.按照经典力学的理论,光既然是一种波动,就一定要靠介质才能传播.于是,人们提出了所谓光的以太假说.为了探测以太的存在,1880 年迈克耳孙在柏林大学的赫姆霍兹实验室,开始筹划用干涉方法测量以太漂移速度的实验.之后,迈克耳孙精心设计了著名的迈克耳孙干涉装置,进行了耐心的实验测量.直到 1887 年 7 月也没能得到理论预期的以太漂移的结果,为最终否定以太假说奠定了坚实的实验基础,为爱因斯坦建立狭义相对论开辟了道路.后来,人们利用装置的原理制成了迈克耳孙干涉仪,并用于研究光的精细结构和长度标准校准.迈克耳孙干涉仪是用分振幅的方法实现干涉的光学仪器,它设计巧妙,包含极为丰富的实验思想,在物理学发展中具有重大的历史意义,而且得到了十分广泛的应用.例如,可以观察各种不同几何形状、不同定域状态的干涉条纹;研究光源的时间相干性;测量气体、固体的折射率;进行微小长度测量等.在物理实验教学中,因对训练学生的实验操作能力具有重要作用而受到高度重视.本实验要求学会调节迈克耳孙干涉仪,利用等倾条纹的变化测钠光波长.

#### 实验原理

##### 1. 等倾干涉

实验室常用的迈氏干涉仪,其光路结构如图 32-1 所示.它由两块平面反射镜  $M_1$ 、 $M_2$  与两块平行平面玻璃板  $G_1$ 、 $G_2$  所组成.反射镜  $M_1$  可沿导轨前后移动,称为动镜.它的法线与导轨的传动轴线相平行.另一反射镜  $M_2$  装在与导轨成直角的臂上,称为定镜.定镜与动镜的法线相互垂直.在两镜法线的相交处以  $45^\circ$  角安装一块半透膜分光板  $G_1$ ,它的作用是将入射光分成振幅(或光强)近于相等的一束反射光和一束透射光.在  $G_1$  和  $M_2$  之间装一块补偿板  $G_2$ , $G_2$  与  $G_1$  材质相同,厚度相等,且严格平行,起补偿光程的作用.

自面光源  $S$  发出的一束光射到分光板  $G_1$  的半透膜  $P$  后,被分解为振幅相近的反射光①和透射光②,①光经  $G_1$  垂直投射到  $M_1$  上,而后沿原路返回,且透过  $G_1$  射向  $E$  方向;②光透过  $G_2$  垂直投射到  $M_2$  上,并沿原路返回,再透过  $G_2$  射到  $G_1$  半透膜  $P$  上,经半透膜反射将这束光也射向  $E$  方向.①光和②光在无穷远处相干涉.观察者

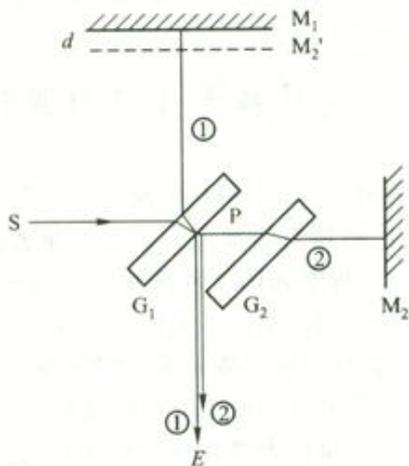


图 32-1 等倾干涉光路图

在  $E$  处,借助调焦于无穷远的望远镜、照相机或眼睛即可观察到干涉现象了。

当观察者从  $E$  处向  $G_1$  看去时,除直接看到  $M_1$  外,还能看到  $M_2$  在  $G_1$  中的虚像  $M_2'$ ,于是①光和②光就如同从  $M_1$  和  $M_2'$  反射来的两束光,因此迈氏干涉仪中的干涉与厚度为  $d$  的空气膜产生的干涉一样,这里  $d$  为  $M_1$  和虚像  $M_2'$  的间隔。

①和②两束光到  $E$  处的光程差  $\delta$  由图 32-2 可知

$$\delta = AB + BC - AD \quad (1)$$

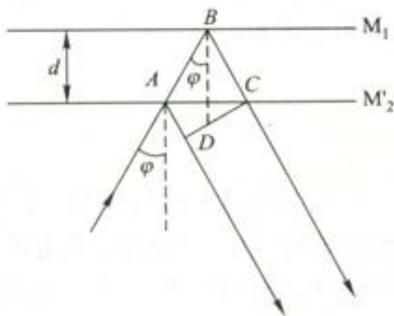


图 32-2 等倾干涉光程差

因为  $M_2 \parallel M_2'$ , 所以  $AB = BC = \frac{d}{\cos \varphi}$

而  $AD = AC \sin \varphi$

又  $AC = 2d \tan \varphi$

将这些关系式代入式(1),整理后得

$$\delta = 2d \cos \varphi \quad (2)$$

根据光的干涉加强和减弱的条件

$$\text{当 } \delta = 2d \cos \varphi = \begin{cases} k\lambda & \text{时, 明条纹} \\ (2k+1) \frac{\lambda}{2} & \text{时, 暗条纹} \end{cases} \quad (3)$$

式中  $k=0, 1, 2, \dots$

由式(3)可见:

1) 若  $d, \lambda$  一定时

干涉级次  $k$  随倾角(入射角)  $\varphi$  变化. 具有相同倾角  $\varphi$  的所有光线的光程差  $\delta$  都相同, 对应同一干涉级次  $k$ , 故称这种干涉为等倾干涉. 不同倾角的光对应于不同的干涉级次, 于是干涉图样是以光轴为中心的同心圆环.

当  $\varphi=0$  时(相当于垂直入射), 干涉级次最大, 对应于干涉圆环中心处.

当  $\varphi \neq 0$  时, 随着  $\varphi$  角的增大, 干涉级次  $k$  变小, 对应的干涉圆环越往外移, 即越向边缘, 干涉圆环的级次越低(这与牛顿环的等厚干涉圆环不同).

2) 若  $k, \lambda$  一定时

对应于同一干涉级次  $k$ , 当  $d$  减小时, 倾角  $\varphi$  必须减小, 则该级圆环越往内缩小, 条纹随之变宽, 看到的现象是干涉圆环“内缩”, 中心圆环“陷入”. 当  $d=0$  时(即  $M_1$  与  $M_2'$  重合), 整个视场无干涉圆环出现.

当  $d$  增加时,  $\varphi$  角势必增大, 看到的现象是条纹变窄, 干涉圆环“外扩”, 中心圆环“涌出”. 当  $d$  增大到一定程度时, 也看不到干涉现象了(为什么?).

上述讨论的干涉图样如图 32-3 所示.

如果  $M_1$  与  $M_2$  不严格垂直, 即  $M_1$  与  $M_2'$  有一较小的夹角  $\theta$ , 这时仍可观察到干涉花样, 其圆心将偏离视场中心, 而处于  $M_1$  与  $M_2$  距离较大处, 甚至处于视场之外, 据此, 就可判断  $M_1$  与  $M_2'$  不平行的情况. 如若  $\theta$  过大, 将观察不到干涉花样.

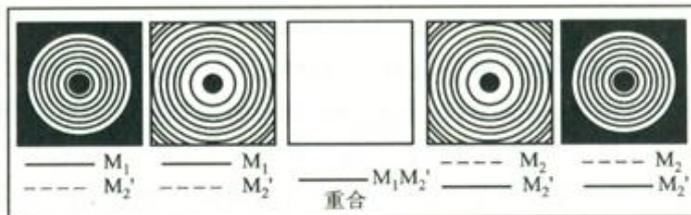


图 32-3 等倾干涉条纹的变化

2. 根据条纹的变化测光波的波长

干涉圆环中心处,  $\theta=0$ , 则式(3)可写成

$$2d = k\lambda \quad (4)$$

当移动  $M_1$  镜使  $d$  增加时, 中心圆环便一个一个地“涌出”, 反之, 当  $d$  减小

时,中心圆环便一个一个地“陷入”.由式(4),只要知道移动的距离  $\Delta d$  和涌出(或陷入)的条纹数目  $\Delta k$ ,便可求出光波的波长

$$\lambda = \frac{2\Delta d}{\Delta k} \quad (5)$$

反之,已知波长  $\lambda$  和  $\Delta k$ ,也可求出移动的距离,这就是干涉测长的原理.

## 仪器介绍

### 迈氏干涉仪的结构

迈克耳孙干涉仪的外形如图 32-4 所示.

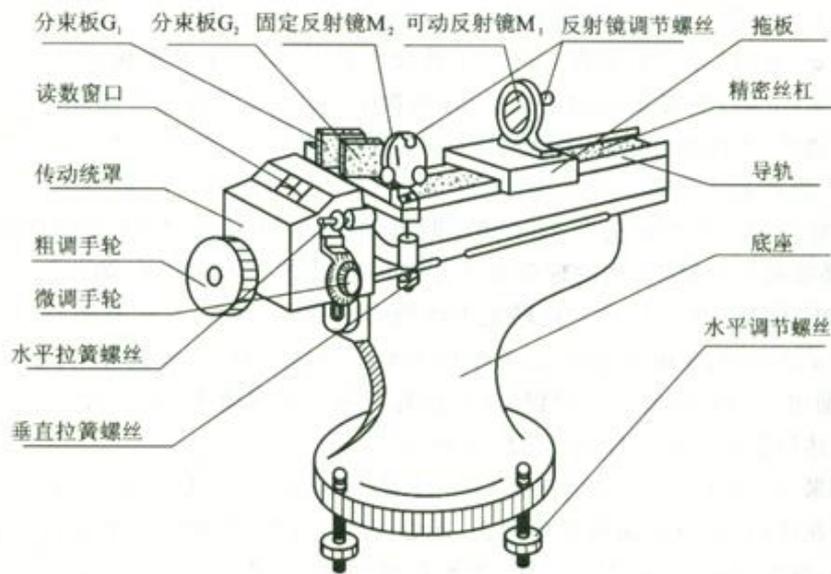


图 32-4 迈克耳孙干涉仪

### 1. 调节系统

仪器的水平由水平调节螺丝调节,一般情况下,在实验室已调好,勿需再调.动镜的法线与导轨传动轴线平行,借助于动镜背面调节螺丝调节.此镜出厂时已调节好,在实验过程中千万不要动它背面的螺丝!

定镜的法线方位角的调节,粗调由定镜背面的调节螺丝进行,细调借助水平拉簧螺丝和垂直拉簧螺丝.

### 2. 动镜 $M_1$ 位置的读数系统

动镜  $M_1$  装在拖板上,拖板由精密丝杠带动,使之沿导轨移动.确定  $M_1$  的位置有 3 个读数尺:主尺是 1 mm 刻度尺,在导轨的侧面,其数值由导轨拖板上标志线指示,毫米以下的读数由两个螺旋测微装置读出,第一套装在丝杠的一端,圆刻度盘上均匀刻有 100 个刻度,丝杠螺距为 1 mm,则每转动粗调手轮一个刻

度时,  $M_1$  镜将移动百分之一毫米(0.01 mm), 转一周移动 1 mm, 从读数窗口可以看到: 第二套在读数窗的右侧有一个微动手轮, 其圆周上刻有 100 个刻度, 每转一周,  $M_1$  移动 0.01 mm, 则微动手轮每转一刻度时,  $M_1$  只移动 0.000 1 mm (即 0.1  $\mu\text{m}$ ).  $M_1$  的位置就是由这 3 个读数之和表示的. 这 3 个读数关系是: 微动手轮转一周(100 个刻度), 粗调手轮读数窗内移动一个刻度; 粗调手轮转 1 周(100 个刻度), 主尺移动 1 mm. 因此, 这套读数系统可把  $M_1$  位置读到万分之一毫米, 估计到十万分之一毫米.

### 实验任务

1. 调节定镜的方位角, 使干涉纹视场中呈现等倾干涉条纹.
2. 利用等倾干涉条纹的变化, 测量钠光的波长.

### 操作提示与提案编写

#### 1. 调节仪器

1) 如果  $M_2'$  与  $M_1$  远离平行状态, 则干涉仪视场中不会出现任何条纹. 这时应设法知道  $M_1$  与  $M_2'$  方位角所处的状态. 方法之一就是在光源入射的路径上固定一个形状比较尖锐的标识物, 这样在视场中就会出现该标识物的两个影像, 一个是从  $M_1$  反射的像, 另一个是从  $M_2'$  反射的像. 当调节  $M_2'$  的方位时, 后一个像跟着移动. 当这个移动的像与前一个像看起来重合时(实际上很难严格的重合), 说明  $M_2'$  与  $M_1$  已经接近平行, 一般情况下就会出现等厚干涉条纹.

2) 根据等厚干涉条纹的走向来判断  $M_2'$  与  $M_1$  交棱的方位, 从而选择用水平拉簧来调节或竖直拉簧来调节  $M_2'$  的方位. 用拉簧螺丝进行细调时, 要随时注意干涉条纹变化的趋势, 根据变化的趋势来判断拉簧螺丝扭动方向是否正确. 如果操作正确, 则这组条纹将越变越弯, 越变越圆, 越变越清晰, 最后成一组同心圆环.

3) 即使在视场中出现了等倾干涉条纹, 也不要急于测量. 因为在大多数情况下这组条纹还存在视差, 它将严重影响测量的准确性. 判断“视差”是否存在的方法是, 在观察这些干涉条纹的同时, 稍稍移动自己的眼睛, 如果从中心“涌出”一些新的条纹, 或从中心“缩进”一些条纹, 则证明有“视差”. 干涉域不在无穷远, 根源在于  $M_2'$  与  $M_1$  并未严格平行. 这时应一边微微调节  $M_2'$  的方位, 一边缓慢移动自己的眼睛, 当这些条纹在局部上无任何变化, 只是整体上跟随你的眼睛同步移动, 这时“视差”便被消除了, 这些干涉条纹才真正定域在无穷远.

#### 2. 测定钠光波长

1) 旋转粗调手轮, 使  $M_1$  移动, 观察条纹的变化, 从条纹的“涌出”或“陷人”, 判断  $d$  的变化, 并观察  $d$  的取值与条纹粗细、疏密的关系.

2) 当视场中出现清晰的、对比度较好的干涉圆环时,再慢慢地转动微调手轮,直至视场中心条纹向外一个一个地涌出(或者向内陷入中心)时,记录  $M_1$  镜的初始位置  $d_0$ ,继续转动转盘,每涌出 50 个条纹,记录一次  $M_1$  镜的位置  $d_i$ ,直至涌出 350 个条纹即记录 8 组数据为止。

### 3. 数据处理及分析

- 1) 列表记录  $d_0, d_1, \dots, d_8$ , 将数据前后平分为两组,并用逐差法求出  $\overline{\Delta d}$ 。
- 2) 按式(5),算出  $\bar{\lambda}$  并与标准值比较。

### 操作程序

1. 调节仪器并消除视差,将干涉条纹定域在无穷远。
2. 测定钠光波长。
3. 数据处理及分析。

### 操作中应注意

1. 迈克耳孙干涉仪是精密光学仪器,绝对不能用手直接触摸各部件的光学表面!
2. 调节  $M_2$  的背部螺钉及微动拉簧螺钉时均应缓缓旋转,并且在调节之前应将各个螺钉置于适中的位置,给螺钉的进与退均留有调节余地。
3. 转动读数手轮,待干涉条纹的变化稳定后才能进行测量。测量一旦开始,读数手轮的转动方向不能中途改变(为什么)。

### 问题讨论

1. 根据公式  $2d \cos \varphi = k\lambda$ ,说明
  - 1) 等倾干涉条纹的形状。
  - 2)  $d$  增加时,条纹怎样变化?  $d$  减少时呢?
  - 3) 如何根据条纹的变化,测光波的波长?
2. 在调节  $M_2$  的方位时,如果在  $E$  方向的视场中无任何条纹,该怎样操作? 视场中出现一组竖直条纹时该怎样操作? 视场中出现一组水平条纹时呢?
3. 同心干涉圆环定域在无穷远时,若视差没消除,干涉图样是何状态? 原因如何? 怎样操作才能消除视差?

### 阅读材料

迈克耳孙(1852—1931) 艾伯特·亚伯拉罕·迈克耳孙,美国物理学家、诺贝尔奖金获得者。原籍波兰,1852年12月19日生于波兰的斯特泽尔诺。1854年随家迁居美国,定居于内华达州弗吉尼亚市。1873年毕业于美国海军学院。

1875-1879 年在美国海军学院任教. 1880-1881 年去欧洲研究光学. 1882 年回到美国在俄亥俄州克利夫兰凯西理工学院任教授. 1892 年在美国芝加哥大学任物理系主任. 1931 年 5 月 9 日在美国加利福尼亚州帕萨迪纳逝世.

迈克耳孙一生主要在光的传播和光速的测量方面做出了贡献. 曾创制了迈克耳孙光学干涉仪, 用以测定微小的长度、折射率和光波波长等. 1887 年在实验中测出了光速的基本常数, 并于 1889 年 4 月首先公布所测定的光速每秒为 300147 公里. 1882 年迈克耳孙在凯西理工学院与美国化学家、物理学家 E. W. 莫雷合作发明了光学干涉仪, 并进行了著名的迈克耳孙-莫雷实验. 在实验中, 他们预想光所通过的假想介质以太是静止的, 或相对于地球而运动着, 但实验的结果他们发现, 不管观察者在任何方向上运动着, 光的速度均无差别. 这一结论为科学史上否定以太存在提供了重要根据, 并促进了爱因斯坦狭义相对论的建立. 迈克耳孙还用光学干涉仪及其他精密光学仪器精确地测出星体的直径. 1889 年英国伦敦皇家科学院授予迈克耳孙鲁福德奖章, 随后又授予他科普雷奖章. 因研究光学精密仪器及利用这些仪器对光谱学和基本度量学进行研究, 获 1907 年诺贝尔物理学奖金.

著作: ①《光波及其应用》(Light waves and their uses, 1903); ②《光学研究》(Studies in optics, 1927).

### 创新园地

1. 已知钠光波长为 589.3 nm, 迈克耳孙干涉仪的精密丝杠(即调节动镜的传动系统)由于长期使用而出现误差. 请用前面的测量数据, 求出精密丝杠读数的修正公式.(提示: 修正公式形如  $A_s = A_0(1 + \alpha)$ ,  $A_s$  为修正后的精密丝杠读数,  $A_0$  为精密丝杠的原读数,  $\alpha$  为修正系数, 用逐差法求.)

2. 利用白光干涉花样, 设计测量透明薄片厚度的实验方案及步骤.

## 实验三十三 单缝衍射

光的衍射现象是光的波动性的重要表现. 根据光源及观察屏到产生衍射的障碍物的距离不同, 分为菲涅耳衍射和夫琅禾费衍射两种. 前者是光源和观察屏到障碍物的距离为有限远时的衍射, 即所谓近场衍射; 后者则为无限远时的衍射, 即所谓远场衍射. 本实验的目的是通过观察、测量单缝的夫琅禾费衍射光强分布, 加深对光的衍射现象的理解.

### 实验原理

#### 光强分布规律

## 实验三十五 全息照相

硅光电池的内阻,请你设计测定硅光电池内阻的测量系统,并说明测量方案.

### 实验三十五 全息照相

全息照相(或称全息术)是利用光的干涉原理记录物光波和利用光的衍射原理再现物光波的一门立体摄影技术.早在1948年就由英国的科学家伽柏<sup>①</sup>提出了理论与方法.由于当时缺少高强度、高相干性的光源,所以这项工作进展的比较缓慢,随着20世纪60年代激光的问世,使得全息照相有了一个合适的光源,因而迅猛的发展了起来,并且相继地出现了多种全息方法,开辟出全息应用的广阔领域.鉴于伽柏这种开创性的研究成果,他被授予1971年度的诺贝尔物理学奖.

从用激光作为光源拍摄出第一张具有实用价值的全息照片起,至今已发展到不仅可以用激光拍摄、激光再现,而且已经发明了激光拍摄、白光再现的全息术,如:反射全息、彩虹全息及合成全息等等.同时也开始了利用白光记录全息图的研究工作.

现在全息照相的理论已应用于信息储存、图像识别、干涉计量、无损检测、物体的表面研究、遥感技术、生物医学及军事科学的各个门类,也深入到我们的日常生活中,如:书籍装帧、防伪商标、家庭玩具和工艺品等.应用了全息技术后,给我们带来越来越多的方便和益处.

本实验将通过静态全息照相的拍摄和再现,了解全息照相的主要特征及操作要领.

#### 实验原理

##### 1. 全息照相的概述

由光的波动理论可以知道,光波是电磁波,它的特征主要取决于其振幅(强度),相位(波前的形状)和波长(颜色).我们要感受到一个真实立体的物体存在,至少应接受到两类信息,即物体发出的一定频率光波的振幅与相位.假使物体不存在,只要能接受到与原物体发出的振幅与相位完全一致的光波,那么一样能感受到与原物体一样逼真的图像.

普通照相是把物体表面漫反射的光波,经过照相机的镜头,形成物体的像,

<sup>①</sup> 伽柏(Dennis Gabor1900—1979) 英国籍匈牙利物理学家,从事电子光学、电子显微镜、高速示波器、气体放电、等离子体物理、通信技术方面的研究,是全息术的创始人.著有《电子显微镜》、《全息术,1948—1971》等.

如果在像位置上放一感光底片,因像的照度和物体相应各点的光强成正比,所以底片经曝光、显影后,就可以得到一个明暗与被摄物体成反比的物体像(负片),把像上的光强分布记录在感光片上,经冲洗加工,在照相纸上就可以得到一个普通的相片.由于普通照相所用的感光材料的感光特性,其频率响应远跟不上光波的频率,感光的程度仅仅与总的曝光量有关,照片上记录的是物体的光强分布,也就是只记录的是物光的振幅,没有把物光的全部信息(振幅、相位)都记录下来.这种照片看上去是平面的,失去了原物体的立体感,所以普通照相得到只是一个二维的平面图像.可见普通照相是利用了光学透镜的物像变换关系.

全息照相则完全不同,它不用相机镜头,而是引入了一个相干的参考光,使其与从物体表面漫反射的物光波在全息干板上发生干涉,从而把物光波携带的全部信息(振幅和相位)记录在全息干板上,即利用干涉现象把每个物点的振幅和相位信息,在平面的介质中以干涉图样的形式记录下来.经过显影、定影等暗室内的处理,把干涉图样留在干板中,这样就拍摄成一个三维的全息照片.干涉图样的亮暗对比反映了物光波振幅的大小,条纹的形状、间隔、走向等几何特征则反映了物光波的相位分布.

全息照相拍摄到的干涉图像呈现的是一幅斑纹状的图样,如果放在高倍显微镜下将看到一幅很复杂细纹状的光栅结构,那么利用光的衍射原理,用与原参考光束入射方向相同的光束——再现光束照射在全息图(光栅)上,再现光束透过全息图发生衍射,在光栅的衍射光波中可以看到一个与原物体相同的三维立体图像.

如上面所叙述得知:全息照相包含有两个过程,第一步是将物光波的全部信息记录在感光材料上,称为记录,第二步是用原参考光照明这个感光材料,使其再现原始物体的光波,称为再现.

全息照相的基本原理对其它的波动过程也都是适用的.

## 2. 全息照相的数学描述

### 1) 全息照相的记录

如图 35-1 所示,是漫反射全息照相拍摄(记录)的光路,分束镜将激光光束分成两束,一束激光经平面镜  $M_1$ 、扩束镜  $L_1$  照射到被摄的物体上,经物体的漫反射,照射到全息干板  $E$  上,称为物光  $\tilde{U}_0$ . 另一束激光经平面镜  $M_2$ 、扩束镜  $L_2$  直接照射到全息干板  $E$  上,称为参考光  $\tilde{U}_R$ .

两束光将在全息干板上产生干涉,形成干涉条纹. 设

$$\text{物光波:} \quad \tilde{U}_0(x, y) = A_0(x, y) \cdot e^{-i\varphi_0(x, y)} \quad (1)$$

$$\text{参考光波:} \quad \tilde{U}_R(x, y) = A_r(x, y) \cdot e^{-i\varphi(x, y)} \quad (2)$$

式中  $A_0, A_r, \varphi_0, \varphi$  分别为物光波、参考光波的振幅和初相位. 当两光波发生干涉,其合成光波为:

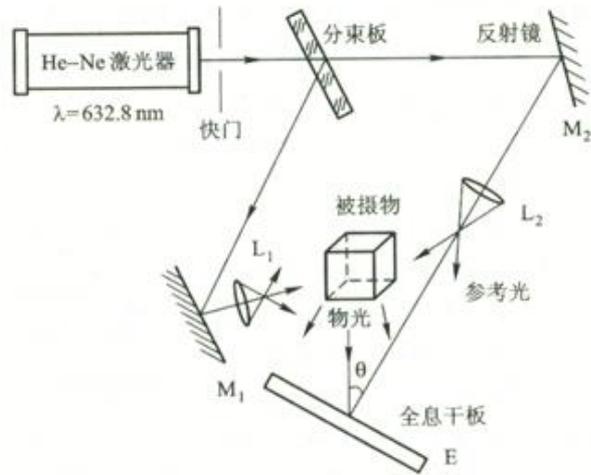


图 35-1 全息照相的记录光路

$$\tilde{U}(x,y) = \tilde{U}_0(x,y) + \tilde{U}_R(x,y) \quad (3)$$

合成光强为:

$$\begin{aligned} I(x,y) &= \tilde{U}(x,y) \cdot \tilde{U}(x,y)^* \\ &= [\tilde{U}_0(x,y) + \tilde{U}_R(x,y)] \cdot [\tilde{U}_0(x,y)^* + \tilde{U}_R(x,y)^*] \\ &= A_0^2(x,y) + A_R^2(x,y) + A_0A_Re^{i(\varphi-\varphi_0)} + A_0A_Re^{-i(\varphi-\varphi_0)} \end{aligned} \quad (4)$$

式中各项的物理意义:第一项  $A_0^2(x,y)$  为物光波的光强分布,第二项  $A_R^2(x,y)$  为参考光波的光强分布,第三项、第四项是交叉项,由物光波和参考光波干涉产生。记录下来之后,形成了干涉图像——光栅,它包含有物光波的振幅和相位信息。

### 2) 物光波的再现

记录有物光波全部信息的干板经显影、定影即成为一张全息图片。将其放回拍摄时的原光路图中,仅用参考光将其照明就可以观察到物像的再现。

图 35-2 是全息干板的曝光特性曲线,曲线上的  $a$ 、 $b$  段为线性工作区,我们在记录拍摄全息图片时可以适当控制干板的曝光量和显影的时间,使得显影后

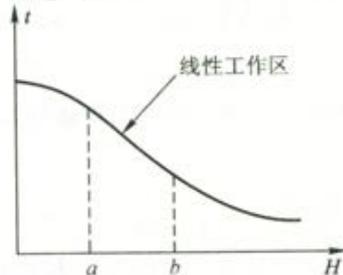


图 35-2 全息干板的曝光特性曲线

的全息图振幅的透过率  $t$  与曝光量  $H$  成线性关系, 即透过率:

$$t = t_0 + \beta H = t_0 + \beta TI \quad (5)$$

式中  $t_0$  为未曝光干板的振幅透过率,  $\beta$  和  $T$  分别为全息干板感光度和曝光时间,  $I$  为物光波和参考光波的合光强. 用原参考光照射全息图时, 经过全息图的衍射后的透射光波为:

$$\begin{aligned} \tilde{U}(x, y) &= \tilde{U}_R \cdot t = A_r e^{-i\varphi(t_0 + \beta TI)} \\ &= A_r e^{-i\varphi} [t_0 + \beta T(A_0^2 + A_r^2 + A_0 A_r e^{i(\varphi - \varphi_0)} + A_0 A_r e^{-i(2\varphi - \varphi_0)})] \\ &= (t_0 + \beta T A_r^2) A_r e^{-i\varphi} + \beta T A_0^2 A_r e^{-i\varphi} + \beta T A_r^2 A_0 e^{-i\varphi_0} \\ &\quad + \beta T A_r^2 A_0 e^{-i(2\varphi - \varphi_0)} \end{aligned} \quad (6)$$

由式(6)中可以看出透过全息图片的光波由四项内容组成.

第一项:  $(t_0 + \beta T A_r^2) A_r e^{-i\varphi}$  是沿再现光方向上的透射光, 振幅是再现光的  $t_0 + \beta T A_r^2$  倍, 这是零级衍射光.

第二项:  $\beta T A_0^2 A_r e^{-i\varphi}$  也是沿再现光方向上的透射光, 由于  $A_0$  不是常数使得此项透射光有一定的扩散, 但由于  $A_0$  一般较  $A_r$  小很多, 因此这项可以忽略.

第三项:  $\beta T A_r^2 A_0 e^{-i\varphi_0}$  是沿原物光波方向的透射光, 也就是原来物光波的波前再现光. 我们沿着此项光波方向观察, 感觉到好像在原物处(原物已取走)依然有一个与原物完全一样的三维物体存在, 这是一个没有畸变, 放大率为 1 的一个虚像(若再现不是原来的参考光, 此项光波产生的像有畸变, 大小也会有变化). 从衍射的角度来看是 +1 级的衍射光.

第四项:  $\beta T A_r^2 A_0 e^{-i(2\varphi - \varphi_0)} = \beta T A_r^2 e^{-i2\varphi} \cdot A_0 e^{i\varphi_0}$ , 式中  $A_0 e^{i\varphi_0}$  是物光波的共轭光波, 它表示的是与原物光传播方向相反的光, 是一束会聚光, 在全息图前可观察到实像.  $A_r^2 e^{-i2\varphi}$  的作用是使共轭物光波  $A_0 e^{i\varphi_0}$  偏离原方向  $2\theta$  角,  $\theta$  是物光与参考光之间的夹角. 所以此光波在偏离原物光  $2\theta$  角方向上形成一个实像.

全息图的观察方法如图 35-3 所示, 原物虚像的观察比较简单, 只要将处理后的全息图放在原处用参考光波  $\tilde{U}_R$  照明, 沿着原物光波的方向观察即可以看到原物的虚像, 若想得到一个没有畸变的实像, 则用原参考光的共轭光波  $\tilde{U}_R^*$  来

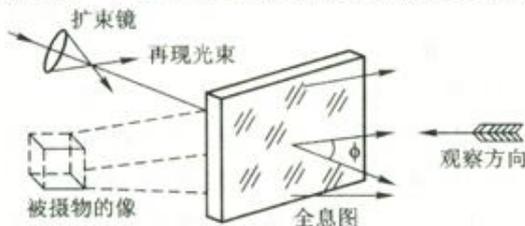


图 35-3 观察虚像

照明全息图,然后用一块毛玻璃在如图 35-4 所示被摄物处移动可接收到实像:

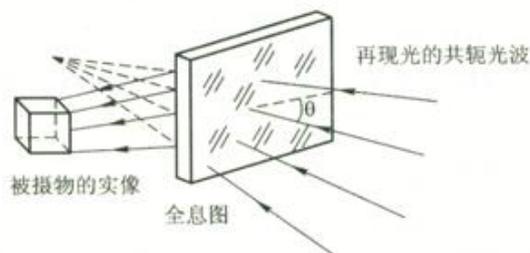


图 35-4 观察实像

### 3. 全息照相的特点

1) 全息图的体视特征: 全息图再现出的被摄物的形象是逼真的三维立体形象,它具有显著的视差特性. 如图 35-5 是以不同的方向去观察全息图时所看到的不同效果.

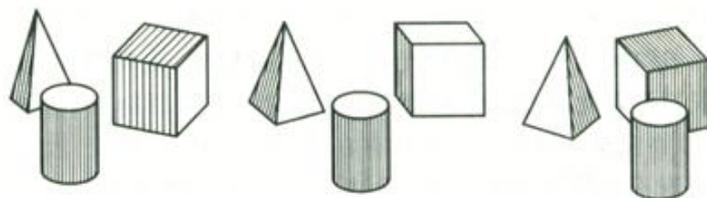


图 35-5 全息图的体视特征

2) 全息图的可分割性: 因为全息图上任一小区域都分别记录了从不同物点发出的不同倾角的物光波信息,所以任一部分的碎片仍然能够再现出完整的被摄物的形象,只不过图像的分辨率要降低一些.

3) 全息图的再现亮度可调: 因为照射全息图的再现光是入射光的一部分,所以再现光越强,再现的像就越亮,反之则越暗. 实验指出,亮、暗的调节可达  $10^3$  倍.

4) 全息图再现像的景深范围很大: 从理论上分析,拍摄和再现时相干光的相干长度决定景深范围. 激光的相干长度较大,因此景深范围较大. 观测细小物体的运动特别是悬浮体的运动,利用全息技术比较方便.

5) 全息图的多重记录性: 同一张全息干板可以多次重复曝光记录. 一般只要在每次拍摄曝光之前稍微改变全息干板的方位,或改变参考光的入射方向,物体在空间的位置就可以在同一全息干板上重叠记录. 在观察不同景物的再现像时,只要适当转动全息图即可.

6) 全息图再现的像可放大、缩小: 用不同波长的激光照射全息图, 由于与拍摄记录时所用激光的波长不同, 再现的物像就会放大或缩小(物像变化是波长放大或缩小的结果)。

7) 全息图易于复制: 全息图没有正负片之分, 如将拍摄记录的全息图与未感光的全息干板相对压紧进行翻拍就可以得到一张新的子全息图, 用激光照射这个子全息图, 仍然可以获得与母片相同的再现像。这是因为全息图中的干涉条纹对于母片和子片来说, 只相当于在全息干板上位移了半个条纹宽度(相位差 $\pi$ ), 而这一区别对再现的衍射现象来说是不易被察觉的。

#### 4. 全息照相装置的基本条件

1) 要有一个好的相干光源: 对于一般较小的漫反射物体常常用 He-Ne 激光作为相干光源。He-Ne 激光的波长  $\lambda = 632.8 \text{ nm}$ , 相干长度约 20 cm。但它的相干长度仍是有限的, 为了保证拍摄到较好的全息图, 应使物光和参考光的光程差要小, 一般要求在 0~4 cm 之间。

2) 要有一个足够稳定的全息光学平台: 全息图上的干涉条纹是很细密的, 从理论分析可知条纹的宽度  $d = \lambda / 2 \sin\left(\frac{\theta}{2}\right)$ , 由此公式可估计一下条纹的宽度, 当物光波与参考光波之间的夹角  $\theta = 60^\circ$ ,  $\lambda = 632.8 \text{ nm}$ , 则  $d = 10^{-4} \text{ cm}$  左右。可见在拍摄记录时, 条纹移动不能大于  $10^{-5} \text{ cm}$ 。因此在记录的过程中, 每一个光学元件有一任何微小的移动或振动, 哪怕是气流的扰动, 都可能会使干涉条纹不清, 无法再现原始的物像。因此在拍摄记录过程中, 光路中各个光学元件都必须牢牢固定在防震的光学平台上面。从公式可知, 当  $\theta$  减小时,  $d$  增大, 抗干扰性增强。综合考虑  $\theta$  角在  $30^\circ \sim 40^\circ$  之间较合适。另外缩短曝光时间, 保持环境安静都是有利的。

3) 高分辨率的感光材料: 普通照相用的感光材料由于银化合物的颗粒较粗, 故感光底片分辨率较低, 仅为 50~100 条/mm, 不能用来记录全息照相中细密的条纹。因此必须采用特制的高分辨率的感光底片。全息干板是用极细微颗粒卤化银明胶乳剂涂在玻璃板上制成的, 分为几个型号。其中全息 I 型干板, 分辨率可达 3 000 条/mm, 它对红光感光, 安全灯为绿灯, 很适合使用 He-Ne 激光拍摄全息图。

### 仪器介绍

为满足全息照相的要求, 需要的设备仪器有: 全息防震台、He-Ne 激光器、全息干板、反射镜、分束镜、扩束镜、全息干板架、灵敏电流计、硅光电池、多个三维调节磁性吸附台座及暗室需要的各类药品等。下面简介主要的仪器设备。

1. 全息防震台: 80 年代生产的防震台是由 1.0 cm 厚的钢板和防震的气囊

组成,各种光学元件可以用磁钢或螺钉固定在钢板上.其价格比较便宜.近几年来国内已有很多厂家生产精密隔震的各类型号的光学平台,器件齐全,防震效果好,更适宜全息照相及多种光学实验使用.

2. 激光器:激光器的种类很多,实验室最常用的是 He-Ne 激光器.此种激光器的结构是一个气体放电管,管内充有氦、氖混合气体,管两端有反射镜构成谐振腔,光在两端反射镜面间多次反射,形成持续振荡,输出激光. He-Ne 激光器输出光波的波长  $\lambda = 632.8 \text{ nm}$ .输出功率在几 mW ~ 几十 mW 之间.使激光器工作的“点火”电压在几千伏左右,操作时应严防触电,由激光管射出的激光束,能量高度集中,切勿迎着激光束直接观看.

3. 灵敏电流计:它是一种高灵敏度的仪表,用来测量微弱电流或微弱电压,如光电流、生理电流、温差电动势等.电流测量范围在  $10^{-6} \sim 10^{-9} \text{ mA}$  之间,电压测量范围在  $10^{-3} \sim 10^{-6} \text{ V}$  之间.其结构和工作原理参考前面章节的有关内容.

### 实验任务

1. 学习光路的布置及全息照相的各类设备仪器的调整检查技术.将各光学元件按图 35-6 所示,在防震光学平台上布置成一个迈克耳孙干涉光路,以检查光学平台的稳定性.

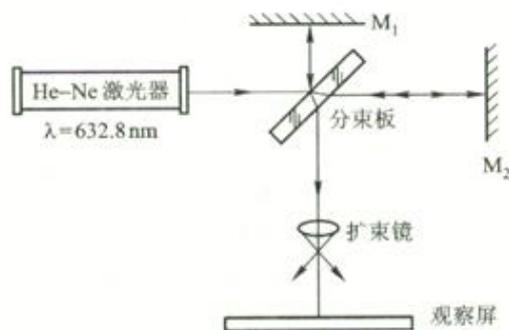


图 35-6 迈克耳孙光路图

2. 拍摄静物的全息图.调解光路,按图 35-1 排好光路.(调节时全息干板不要放上,先用一白屏代替)测量物光光程和参考光光程,使参考光束和物光束的光程尽量相等.测量出参考光束和物光束光强,调节好一个合适的光强比,根据总光强确定曝光时间进行曝光,冲洗干板后就可以得到一张全息图.

3. 观察全息图的再现现象.首先看彩虹,将全息图放在白光下可由透射光或反射光看其是否有彩色衍射光(彩虹),如有的话说明拍摄成功.将拍摄好的全

组成,各种光学元件可以用磁钢或螺钉固定在钢板上.其价格比较便宜.近几年来国内已有很多厂家生产精密防震的各类型号的光学平台,器件齐全,防震效果好,更适宜全息照相及多种光学实验使用.

2. 激光器:激光器的种类很多,实验室最常用的是 He-Ne 激光器.此种激光器的结构是一个气体放电管,管内充有氦、氖混合气体,管两端有反射镜构成谐振腔,光在两端反射镜面间多次反射,形成持续振荡,输出激光. He-Ne 激光器输出光波的波长  $\lambda = 632.8 \text{ nm}$ .输出功率在几 mW ~ 几十 mW 之间.使激光器工作的“点火”电压在几千伏左右,操作时应严防触电,由激光管射出的激光束,能量高度集中,切勿迎着激光束直接观看.

3. 灵敏电流计:它是一种高灵敏度的仪表,用来测量微弱电流或微弱电压,如光电流、生理电流、温差电动势等.电流测量范围在  $10^{-6} \sim 10^{-9} \text{ mA}$  之间,电压测量范围在  $10^{-3} \sim 10^{-6} \text{ V}$  之间.其结构和工作原理参考前面章节的有关内容.

### 实验任务

1. 学习光路的布置及全息照相的各类设备仪器的调整检查技术.将各光学元件按图 35-6 所示,在防震光学平台上布置成一个迈克耳孙干涉光路,以检查光学平台的稳定性.

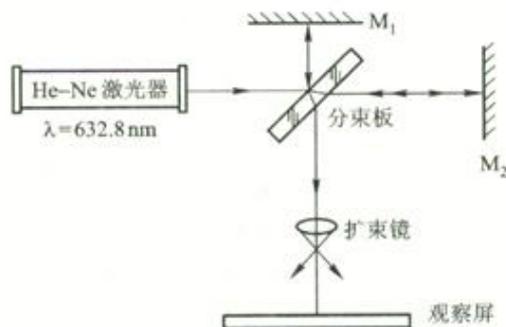


图 35-6 迈克耳孙光路图

2. 拍摄静物的全息图.调解光路,按图 35-1 排好光路.(调节时全息干板不要放上,先用一白屏代替)测量物光光程和参考光光程,使参考光束和物光束的光程尽量相等.测量出参考光束和物光束光强,调节好一个合适的光强比,根据总光强确定曝光时间进行曝光,冲洗干板后就可以得到一张全息图.

3. 观察全息图的再现现象.首先看彩虹,将全息图放在白光下可由透射光或反射光看其是否有彩色衍射光(彩虹),如有的话说明拍摄成功.将拍摄好的全

息图放回光路中,遮住物光和被拍摄物体,用参考光来照明,可以观察到物像.如用一白光屏在再现光波的另一侧的适当位置,可以接收到物体的实像.

### 操作提示及操作程序的编写

1. 检查光学平台的稳定性,调节迈克耳孙干涉仪,使屏上出现干涉条纹.观察在设定的曝光时间内,有无超过 $\frac{1}{4}$ 条纹间距的变化,如果没有这样大的变化,防震光学平台可以使用.如超出了变化的要求,则还要检查光学平台的防震情况.如检查各光学元件是否夹紧等等.

2. 拍摄全息图时控制物光束与参考光束的光程差不要超出4 cm,夹角 $\theta$ 在 $30^\circ \sim 40^\circ$ 之间.光强比一般控制在8:1~1:1之间比较合适,光束的强度可以使用硅光电池和灵敏电流计来测量.照射到光屏上的光束强度的大小,可以移动扩束镜的位置进行调节(亦可使用不同焦距的扩束镜或衰减片进行调节).曝光时间由激光器的功率、全息干板的感光灵敏度、物体的大小及漫反射的性能等来确定.需要几秒到几十秒,甚至更长时间.最佳时间应通过试拍确定.冲洗干板可使用D-19显影液、F-5酸性定影液.

3. 全息图的观察,看彩虹时如彩虹越亮说明全息图的衍射效率越高,反之则低(遇到这种情况可漂白处理).若要顺利的看到一个和原物体一样的实像,须用原参考光的共轭光波 $\tilde{U}_R^*$ 来照明全息图,方可接收到实像.

4. 根据上面的提示编写好实验的操作程序.

### 课堂讨论题

1. 普通照相与全息照相有什么不同,全息照相主要特点是什么?
2. 拍摄全息照相必须具备哪些基本条件,拍摄一张好的全息图关键是什么?
3. 为什么要求光路中的物光束和参考光束的光程尽量相等?
4. 如何判断全息图拍摄成功,干涉条纹的亮暗对比和疏密程度反映了什么?
5. 如何观察再现的物像,扩束的大小及照明方向的改变对再现有什么影响?
6. 如用物光照明全息图,将看到什么样的情况?
7. 为什么打碎的全息图仍然能够再现被摄物的立体像?
8. 能否用普通的印相方法复制全息图?

## 阅读材料

### 全息电影

全息电影是将全息术与电影技术相结合的产物,它是利用光的干涉原理和人眼的视觉残留效应,将被摄的运动景物以一定的时间频率和干涉条纹的形式记录在具有高分辨率的全息胶片上.用一种特殊的放映机放映,观众就可以看到屏幕上的运动着的景象具有三维的立体效果,很难同真实的景物相区别.全息电影的图像非常逼真,而且亮度高、景深大、信息的密度高.还有,观看全息电影不用戴偏振眼镜,欣赏起来非常舒适.

研制全息电影主要的工作有如下几个方面:首先是拍摄及放映系统的研制、制作比较大的屏幕、高分辨率全息胶片的研发.其次要使制作出的屏幕应具有这样一种功能:在较大的面积上能把单个空间立体像扩变成 200~400 个或者更多的空间立体像.

现在有几种全息电影的方案,一种被称做为透镜-点聚焦系统,另外一种被称为傅里叶变换-线聚焦系统,还有一种是彩色合成系统和点扫描系统.这些方案有各自的优点.共同点是能以较小的全息图供给大量的观众看.而且胶片上有脏点或划痕都不影响影像的质量.早在 1975 年前苏联就完成了透镜点聚焦系统的实验验证,并放映了一部长为两分钟的单色全息影片.这之后法国巴黎大学和 Besancon 大学共同研制的全息电影曾经做过公演,但容纳的人数甚少.

目前全息电影距离全面的实际应用还要有待一些时日,但是全息电影迷人的前景必将引起更多人的关心和瞩目.

### 创新园地

由全息照相的实验已经知道,全息图是两束相干光发生干涉的图样.干涉条纹相当于一个比较复杂的光栅.那么调整物光束和参考光束均为平行光时,它们的干涉结果将是一组平行的条纹——光栅.这种光栅是用全息照相的方法制成的,故称为全息光栅.全息光栅的应用较广,制作方便,希望同学们能利用实验室现有的设备,设计一个制作全息光栅的实验,并能将自己拍摄的全息光栅应用于其他光学实验中去.

#### 提示

1. 选择仪器设备:全套全息照相的设备,两个望远镜(倒置后可将物光束和参考光束扩展成两束平行光),衰减片,小孔光阑等.
2. 设计实验光路:使两束光在全息干板处的夹角为  $15^\circ \sim 20^\circ$ ,光强比为 1:1,光程差约等于零.

## 实验三十六 铁磁材料居里点的测量

实验三十六 铁磁材料居里点的测量 267

3. 曝光时间:曝光时间可通过试拍确定。
4. 拍摄全息光栅:参照全息照相的过程拍摄出全息光栅。
5. 确定光栅常数:用一激光束垂直照射全息光栅,观察衍射条纹,按公式:

$$d = L\lambda/\Delta$$

估算光栅常数  $d$ . 式中  $L$ :全息光栅到两光源平面的垂直距离,  $\Delta$ :干涉纹的间距,  $\lambda$ :入射光的波长.

### 实验三十六 铁磁材料居里点的测量

随着高科技时代的到来,各种磁性材料和磁性器件的应用亦随之日益广泛.它们不但在科学研究、工农业生产、医疗卫生等方面被普遍使用,而且由于计算机的普及,及各种家用电器大量的涌入我们日常生活之中,磁材料已成为不可缺少的消费品(衡量一个国家高科技发展状况,磁材料的消耗量亦已是一个重要指标.).

发展磁材料,必须对表征磁性材料性质和特征的物理参数进行深入的研究.居里点(亦称居里温度)  $T_c$  是铁磁材料饱和磁化强度  $M_s$  随温度升高而降为零的一个临界温度点,了解居里点是研究铁磁材料性质及其应用的一项工作.测量铁磁材料居里点的方法很多,如:比热容法、中子散射法、感应法、谐振法、电桥法等.其中以中子散射法最为准确,但这种方法是很复杂的,简易的方法有定性的直接观测,或者测量出铁磁材料的饱和磁化强度  $M_s$  (或其他能反应出铁磁材料磁化强度的物理量)与温度  $T$  的关系,作出曲线,由曲线的切线求出居里点等.测量磁化强度和居里点的仪器很多,本实验是用示波器配合一种简易的居里点测试仪完成几种铁磁材料居里点的测定,了解居里点的物理意义和测量居里点的方法.

#### 实验原理

磁性是物质最基本的属性之一,所以我们将具有磁效应的所有物质都称为磁介质.磁介质放入磁场中会产生一个附加的磁场,使原来的磁场发生变化.这种现象被称之为磁介质的磁化.根据磁化的不同效果,磁介质可分为三类,一类物质在外磁场中呈现微弱的磁性,磁化后有与外磁场同方向的附加磁场,这类物质称为顺磁质,另一类物质它们在外磁场中也呈现微弱的磁性,但附加磁场与外磁场的方向相反,这类物质称为抗磁质.第三类物质它们在外磁场中能产生非常强的与外磁场同方向的附加磁场,这类物质称之为铁磁质.这是一类用途很广的磁介质.

磁介质磁化规律可以用磁感应强度  $B$ 、磁化强度  $M$  和磁场强度  $H$  来描写.

它们之间的关系可用下列的公式来表示:

$$B = \mu_0(H + M) = (\chi_m + 1)\mu_0 H = \mu_0 \mu_r H = \mu H \quad (1)$$

式中  $\mu_r$  称为相对磁导率, 它是一个无量纲的常数.  $\chi_m$  称为磁化率;  $\mu_0$  称为真空磁导率 ( $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$ );  $\mu = \mu_r \mu_0$  称为绝对磁导率. 对于顺磁质的磁化率  $\chi_m > 0$ , 相对磁导率  $\mu_r$  略大于 1; 对于抗磁质的磁化率  $\chi_m < 0$ , 相对磁导率  $\mu_r$  略小于 1; 铁磁质的磁化率  $\chi_m \gg 1$ , 所以相对磁导率  $\mu_r \gg 1$ .

铁磁质是与物质的固态相联系着的, 它的磁化过程很复杂,  $H$  与  $B$ 、 $H$  与  $M$  和  $\mu_r$  之间存在着非线性的关系. 磁感应强度  $B$  与磁场强度  $H$  之间的关系, 如图 36-1 所示, 实线表示  $B-H$  的关系, 铁磁质从完全没有磁化时开始逐渐增大  $H$ , 当  $H$  较小时,  $B$  随  $H$  成正比的增大.  $H$  再增加时,  $B$  就开始急剧的增大, 接着增大变慢, 当  $H$  到达某一数值时再继续增大,  $B$  就几乎不在随  $H$  增大而增大, 这时铁磁质到达了磁饱和状态, 它的磁化强度  $M$  也达到了最大值为  $M_s$ , 所得到的这条曲线叫做起始磁化曲线. 根据  $\mu_r = B/\mu_0 H$ , 可以求出不同的  $H$  值所对应的  $\mu_r$  值,  $\mu_r - H$  的变化曲线见图 36-1 中的虚线所示, 由图中可以看到, 当  $B$  值趋于饱和时,  $\mu_r$  就急剧的减小.

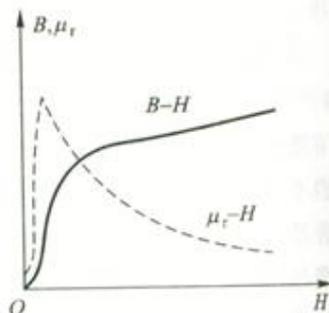


图 36-1  $B$  与  $\mu_r$ 、 $H$  的关系

实验证明, 各种铁磁质的起始磁化曲线都是“不可逆的”, 即当铁磁质达到磁饱和后, 如果减小  $H$  值,  $B$  值并不能沿起始磁化曲线逆向减小, 当  $H=0$  时,  $B$  并不等于 0, 而是还保持一定的值, 这种现象叫做磁滞效应. 如果我们给一个环状的铁磁质绕上线圈, 在图 36-2 所示的  $L_1$  线圈中通一交变电流, 产生一交变  $H$ , 使铁磁质往复磁化, 这时铁磁质的  $B$  与  $H$  的关系可用图 36-3 的磁滞回线来表示 (见实验二十六). 实验还证明  $B$ 、 $\mu_r$  不仅仅是磁场的函数, 而且是温度的函数, 当温度上升到某一值时, 铁磁质由铁磁转变为顺磁质, 把这个温度叫做居里点. 很显然铁磁质的温度高于居里点时, 磁滞回线是会消失的. 图 36-2 中, 如果将电阻  $R_1$  的端电压送至示波器  $X$  轴, 将电容  $C$  的端电压送至示波器的  $Y$  轴, 则在荧光屏上会呈现图 36-3 所示的磁滞回线. 如果对被测样品加热, 则该回线形

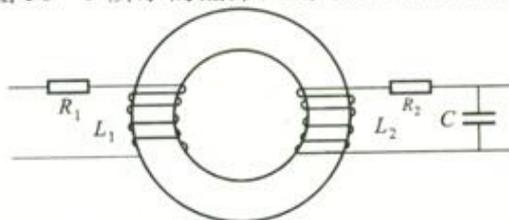


图 36-2 环状铁磁质

状将发生变化,当温度达到居里点时, $Y$ 轴图形高度降为零,该回线将变成一条水平线.实际上,不用示波器也可以测量居里点.测量方法是,对样品的温度 $T$ 和电容 $C$ 的交变电势 $\varepsilon$ 进行双变量测量,根据 $\varepsilon-T$ 曲线求出居里点温度,我们已经知道, $\varepsilon$ 与 $B$ 成正比, $B-T$ 曲线与 $\varepsilon-T$ 曲线的形状是一致的,当 $B$ 降为零时, $\varepsilon$ 也降为零,如图36-4.在曲线的拐点处作一切线,可以理解切线与横坐标的交点就是所求的居里点 $T_C$ .

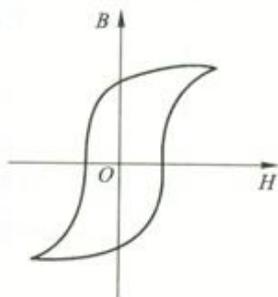


图 36-3 磁滞回线

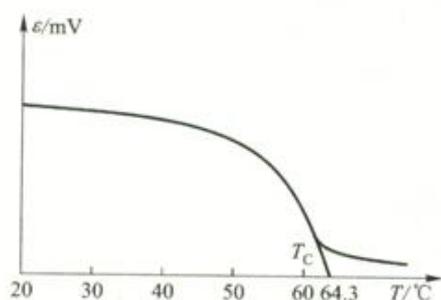


图 36-4 感应电动势-温度曲线

### 仪器介绍

本实验需要示波器、被测量的铁磁质样品、加热的设备和 $H$ 、 $B$ 信号处理的电路装置.下面就一些主要的仪器设备作一介绍.

1. JLD-Ⅱ型居里点测试仪:此装置的板面如图36-5所示,它提供了电源的供给、温度设置、控制及 $H$ 、 $B$ 信号处理的各项功能.

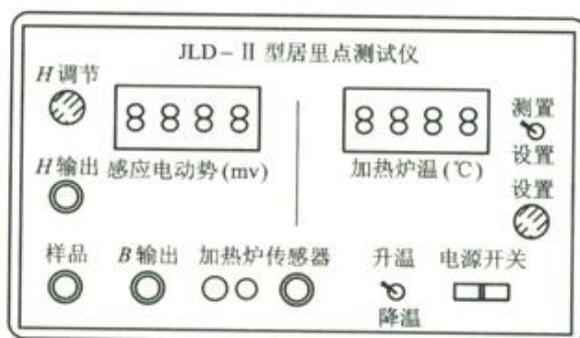


图 36-5 居里点测试仪

2. 加热炉:炉的两端有两个降温风扇的旋钮用来开合电风扇,从炉下引出温度传感器和降温风扇的插件,用于对接JLD-Ⅱ型居里点测试仪对应的两个插座.

3. ST16型示波器:其使用可参看本书实验十九的有关内容.

## 4. 五只待测温敏磁环样品。

**实验任务**

1. 定性观察铁磁质的磁化现象,对铁磁质进行加温,当温度升至某一数值磁滞回线消失时,由数显温度表上读出此时的温度  $T_c$ ——居里点。

2. 定量测量——作温度与感应电动势曲线( $T-\varepsilon$ 曲线),设置好炉温,待加热炉开始工作时由初始温度开始,对应一个温度值  $T$ ,读出相应的感应电动势  $\varepsilon$ ,作出  $T-\varepsilon$  曲线.在曲线最大斜率处作切线,求出居里点  $T_c$ 。

**操作提示及操作程序编写**

1. 定性观察,将居里点测试仪同示波器连接,调出磁滞回线.加热样品,当样品到达居里点温度时,磁滞回线消失,同时数显温度表显示测量温度值——该样品的居里点  $T_c$ 。

2. 定量测量  $T-\varepsilon$  曲线过程的提示

1) 测量样品居里点时,注意要由低温向高温测量,即每次测量新样品时都要让加热炉降温后再放入样品测量,这样可以避免由于样品和温度传感器响应的不同,不能达到热平衡。

2) 注意安装温度传感器时尽量让其边缘同待测样品接触,否则采集的温度值不准。

3) 实验中随着温度的提高, $L_1$  中的电感量要不断减少, $H$  信号相对的要提高,因此实验中应适当的对示波器  $X$  轴进行调节,以显示出比较理想的磁滞回线。

4) 由于样品的两个线圈  $L_1$ 、 $L_2$  互绕在一起,有一定的电感,始终有一定的感应电动势,当磁滞回线变为一条直线时,不能将示波器的  $Y$  轴衰减无限制的减小。

3. 根据提示编写操作程序。

**课堂讨论题**

1. 复习示波器的工作原理和使用方法,在用示波器观测磁滞回线时, $X$ 、 $Y$  轴的各控制旋钮应该处于哪个位置?

2. 何为磁滞效应?铁磁质在居里点的温度下是否还有磁滞效应?

3. 用“ $T-\varepsilon$  曲线”法测量铁磁质的居里点,都需要哪些仪器和设备?

4. 安装温度传感器和待测样品应注意哪些问题?

5. 实验中要想得到比较理想的磁滞回线应做哪种工作?为什么?

6. 用“ $T-\varepsilon$  曲线”方法求铁磁质的居里点  $T_c$ ,为什么要在斜率最大处作

切线?

7. 可以用许多方法去求居里点  $T_c$ , 你能说出几种方法?
8. 想一想能否用铁磁质的温度特性设计一个控温器件? 并加以说明.

### 阅读材料

一切互为热平衡的物体都具有相同的温度, 这是我们用温度计测量温度的基本依据. 温度计有很多种类, 常用的有液体温度计、热电偶温度计、双金属片温度计以及利用热辐射的规律制成的辐射温度计等. 这些温度计都是我们测量温度的传统的仪器. 随着科学技术的发展, 各类温度传感器不断涌现, 并且取代了许多传统的测温方法和测量仪器. 所谓传感器是将各种非电量按一定的规律转换成便于处理和传输的另一种物理量的装置. 传感器具备很多优点, 如它可以固态化、集成化、多功能化、图像化和智能化等等. 按使用的测温元件不同, 温度传感器有不少种类, 下面介绍几类测温元件, 希望能引起大家的关注和兴趣.

1. 光纤. 光纤技术是近几年发展起来的新技术, 用光纤制成的光纤传感器, 具有抗电磁干扰、使用安全、耐腐蚀等优点. 因此可以解决一些用常规的电传感器难以解决的问题, 光纤传感器有功能型的, 也有传光型的, 主要有遮光式光纤温度计, 它的测温范围在  $10 \sim 50 \text{ }^\circ\text{C}$  之间, 检测精度为  $0.5 \text{ }^\circ\text{C}$ . 其次是透射型半导体光纤传感器, 由于这类传感器可以用多种具有温敏性质的半导体材料制成, 所以不同光谱的光源及不同的半导体材料, 可以获得不同的测温范围. 还有荧光发光型光纤温度传感器, 这种传感器能精确的测量  $-50 \sim 200 \text{ }^\circ\text{C}$  的温度, 检测精度达  $0.1 \text{ }^\circ\text{C}$ .

2. AD590 集成温度传感器. 这种传感器是由多个参数相同的三极管和电阻组成, 这种传感器的特点是温度与工作电流成正比, 抗干扰能力强, 互换性好, 已被广泛地应用于科学研究、工业及家用电器诸方面.

除上述的几种传感器此外还有诸如: PN 结、热敏电阻、铜电阻等制成的温度传感器, 如有兴趣可参看有关传感器的专著.

### 创新园地

从图 36-1 中可以看到相对磁导率  $\mu_r$  随磁场强度  $H$  的增强而增大, 达到极大值之后开始减小, 当  $H$  值很大时,  $\mu_r$  接近于 1. 我们把  $H=0$  时的磁导率  $\mu_i$ , 称为起始磁导率. 在实验原理的叙述中就已说明磁导率不仅是磁场的函数, 而且还是温度的函数. 当铁磁质接近居里点温度时, 其起始磁导率  $\mu_i$  达到极大值, 利用这一性质, 测量不同温度下的磁导率  $\mu_i$ , 画出  $\mu_i - T$  曲线, 曲线突变点(峰值)所对应的温度就是居里点  $T_c$ . 请同学们根据此原理设计一个实验, 测量出某一铁磁质的居里点  $T_c$ .

**提示**

1. 起始磁导率  $\mu_i$  可以用任何一种交流电桥来测量. 我们知道任何线圈都有自感现象, 对于环状铁磁质制成的螺线管, 其自感  $L_A$  可用如下公式表示:

$$L_A = \frac{\mu_0 \mu_i N^2 h}{2\pi} \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) = \mu_i L_0 \quad (2)$$

式中  $N$  为螺线管匝数,  $h$  为磁心的高度,  $r_1$  和  $r_2$  分别为磁心的内外径. 当螺线管的几何尺寸和匝数  $N$  已知, 就可以通过测量电感求出磁导率. 交流电桥的使用见实验四十二.

2. 当通过螺线管的电流较小时(刚开始磁化时的电流)可以认为这时的磁导率即是起始磁导率  $\mu_i$ .

3. 可用本实验中的加热炉给待测样品加温.

## 实验三十七 电介质介电常数的测量

在陶瓷技术、电子工业技术、功能材料等各类材料学科中都要研究电介质. 而介电常数(亦称电容率)则是表征电介质在外电场的作用下极化行为的宏观物理量. 测量出某种电介质材料的介电常数不但可以得知此材料极化能力的强弱, 而且可以从理论上预言它和其他导体材料组成的电系统的特性. 对于电介质均匀的材料, 介电常数表现为常数, 当电介质不均匀时, 介电常数将是坐标的函数.

测量介电常数的方法繁多, 其中一些方法需要的设备与工艺较复杂, 本实验介绍的“谐振法”和“电桥法”分别可以测出液体和固体的介电常数, 样品制作比较容易, 测量方法和工艺也简便.

### 实验原理

电介质的介电常数也称电容率, 用  $\varepsilon$  来表示, 单位是法/每米, 符号为 F/m, 真空介电常数用  $\varepsilon_0$  表示, 而相对介电常数用  $\varepsilon_r$  来表示,  $\varepsilon_r = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}$ . 对于两个极板面积和极板间距都相同的平板电容器, 一个极板间处于真空状态, 另一个充满了电介质, 在维持两极板间相同的电压下, 测出两个平板电容器的电容量分别为  $C_0$  和  $C$ , 则有如下的关系:

$$\varepsilon_r = \frac{C}{C_0}$$

故测量电介质的介电常数, 常常是通过测量样品的电容量来求出的.

## 实验四十四 密立根油滴法测电子电荷

4.  $\mathcal{E}$  和  $B$  函数关系如何? 请推导出来.

### 实验四十四 密立根油滴法测电子电荷

一个电子所带的电荷值称为基本电荷,它是重要的物理量之一.美国物理学家密立根于1907年开始,历经7年的时间,用油滴法直接证实了“电”的不连续性,并且第一次精确地测量了电子的电荷.这就是著名的密立根油滴实验,它是近代物理学发展中具有重要意义的实验.

本实验采用一种比较简单的方法来测定电子的电荷量  $e$ ,通过密立根油滴实验来验证电荷的量子化,即电量不是连续变化的,而是基本电荷(电子的电量绝对值)的整数倍.通过实验时对仪器的调整、油滴的选择、耐心地跟踪和测量以及数据的处理等,培养学生严肃认真和一丝不苟的科学态度.

#### 实验原理

用喷雾器将油滴喷入两块相距为  $d$  的水平放置的平行极板之间,如图44-1所示,油滴在喷射时由于摩擦,一般都是带电的.设油滴的质量为  $m$ ,所带电量为  $Q$ ,两极板间所加的电压为  $U$ ,则油滴在平行极板间将同时受到两个力的作用,一个是重力  $mg$ ,一个是静电力  $QE = Q \frac{U}{d}$ .如果调节两极板间的电压  $U$ ,可使两力相互抵消而达到平衡,此时,有

$$\begin{aligned} mg &= Q \frac{U}{d} \\ Q &= mg \frac{d}{U} \end{aligned} \quad (1)$$

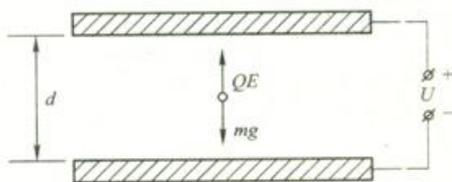


图44-1 平行极板间的油滴

可见测出了  $U$ 、 $d$ 、 $m$ ,即可知道油滴的带电量  $Q$ .由于油滴的质量  $m$  很小(约  $10^{-15}$  kg),必须采用特殊的方法才能加以测定,下面来推导测量  $m$  的公式.

平行板未加电压时,油滴受重力作用而加速下降,但空气对油滴所产生的粘滞阻力  $F_r$  与速度成正比,油滴走了一小段距离到达某一速度  $v_g$  后,粘滞阻力与

重力平衡(见图 44-2, 空气浮力忽略不计), 油滴将匀速下降, 由斯托克斯定律知

$$F_r = 6\pi r\eta v_s = mg \quad (2)$$

式中,  $\eta$  是空气的粘度,  $r$  是油滴的半径(由于表面张力的原因, 油滴近乎呈小球状). 设油滴的密度为  $\rho$ , 则油滴的质量  $m$  也可用下式表示

$$m = \frac{4}{3}\pi r^3\rho \quad (3)$$

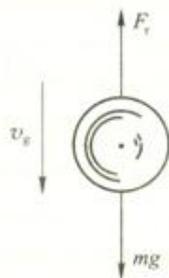


图 44-2 油滴受力分析

合并式(2)和(3), 得油滴的半径为

$$r = \sqrt{\frac{9\eta v_s}{2\rho g}} \quad (4)$$

对于半径小到  $10^{-6}$  m 的小球, 油滴半径近似于空气中孔隙的大小, 空气介质不能再认为是连续的, 而斯氏定律只能对连续介质才正确, 因而斯氏定律应修正为

$$F_r = \frac{6\pi r\eta v_s}{1 + \frac{b}{pr}}$$

式中,  $b$  为一修正常数,  $b = 8.22 \times 10^{-3}$  m · Pa,  $p$  为大气压强, 单位为帕(Pa). 于是得

$$r = \sqrt{\frac{9\eta v_s}{2\rho g \left(1 + \frac{b}{pr}\right)}} \quad (5)$$

上式根号中还包含油滴的半径  $r$ , 但因它是处于修正项中, 不需要十分精确, 故它仍可用式(4)计算. 将式(5)代入式(3), 得

$$m = \frac{4}{3}\pi \left[ \frac{9\eta v_s}{2\rho g \left(1 + \frac{b}{pr}\right)} \right]^{3/2} \rho \quad (6)$$

当两极板间的电压  $U = 0$  时, 设油滴匀速下降的距离为  $l$ , 时间为  $t$ , 则

$$v_s = \frac{l}{t} \quad (7)$$

$$\text{由式(1)、(6)、(7)得 } Q = \frac{18\pi}{\sqrt{2\rho g}} \left[ \frac{\eta l}{t \left(1 + \frac{b}{pr}\right)} \right]^{3/2} \frac{d}{U} \quad (8)$$

实验发现, 对于同一油滴, 如果我们改变它所带的电量, 则能够使油滴达到平衡的电压  $U$ , 必须是某些特定的值  $U_n$ , 这表示与它相对应的电量  $Q_n$  是不连续的, 由式(1)

$$Q_n = ne = mg \frac{d}{U_n}$$

式中,  $n = \pm 1, \pm 2, \dots$ , 而  $e$  则是一个不变的值.

对于不同的油滴, 可以发现同样的规律, 而且  $e$  是  $Q_1, Q_2, \dots, Q_n$  的最大公约数, 这就证明了电荷的不连续性, 并存在着最小的电荷单位, 它就是电子的电荷值  $e$ .

由式(8), 得

$$ne = \frac{18\pi}{\sqrt{2\rho g}} \left[ \frac{\eta l}{t \left( 1 + \frac{b}{pr} \right)} \right]^{3/2} \frac{d}{U_n} \quad (9)$$

上式就是本实验的理论公式.

### 仪器简介

本实验所用仪器主要有密立根油滴仪、秒表、喷雾器等.

密立根油滴仪是用来测定电子电荷量, 并验证电荷不连续变化的物理实验仪器. 仪器型号虽多, 但原理基本相同. 图 44-3 为 MOD-5 型油滴仪外型.

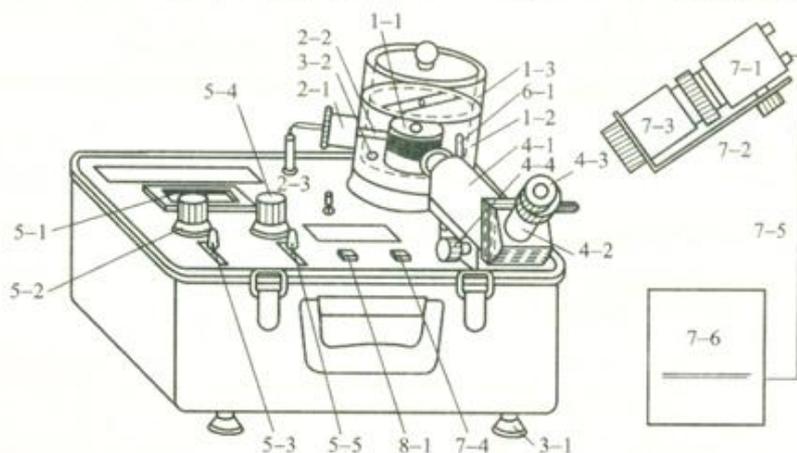


图 44-3 MOD-5 型油滴仪外型图

1-1. 油滴盒 1-2. 有机玻璃防风罩 1-3. 有机玻璃油雾室 2-1. 油滴照明灯  
2-2. 导光棒 2-3. 照明灯电源插座 3-1. 调平螺丝 3-2. 水准泡(在防风罩内)  
4-1. 测量显微镜 4-2. 目镜头 4-3. 接目镜 4-4. 调焦手轮 5-1. 数字电压表  
5-2. 工作电压调节旋钮 5-3. 工作电压反向开关 5-4. 升降电压调节旋钮  
5-5. 升降电压反向开关 6-1. 低压汞灯 6-2. 汞灯按钮(在显微镜右侧, 图上看不见)  
7-1. CCD 7-2. CCD托板 7-3. CCD接筒 7-4. CCD电源插座; 7-5. 视频电缆(75 Ω) 7-6. 监视器 8-1. 计时器插座

油滴仪由油滴盒、油滴照明装置、调平系统、测量显微镜、供电电源以及电子停表、喷雾器等部分组成. 5AC型和5BC型还装有CCD电子显示系统.

油滴盒(1-1)是由两块经过精磨的平行极板(上、下电极板)中间垫以胶木

圆环组成,平行极板间的距离为  $d$ . 胶木圆环上有进光孔、观察孔和石英玻璃窗口(A型、AC型油滴仪没有). 油滴盒放在有机玻璃防风罩(1-2)中. 上电极板中央有一个直径为  $0.4\text{ mm}$  的小孔,油滴从油雾室(1-3)经油雾孔落入小孔,进入上、下电极板之间,油滴盒等整套装置如图 44-4 所示.

油滴盒可用调平螺丝(3-1)调节水平,并由水准泡(3-2)进行检查. 油滴盒防风罩前装有测量显微镜(4-1),通过胶木圆环上的观察孔观察平行极板间的油滴. 目镜头(4-2)中装有分刻板(如图 44-5 所示),其垂直总刻度为  $0.300\text{ cm}$ (每小格  $0.050\text{ cm}$ ),用以测量油滴运动的距离.

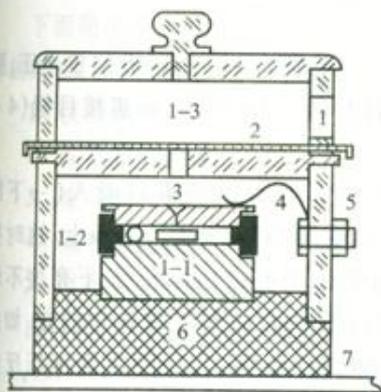


图 44-4 油滴盒等整套装置

1. 喷雾口 2. 油雾孔开关 3. 油雾孔
4. 上电极板压簧 5. 外接电源插孔
6. 油滴盒基座 7. 油滴仪面板

电源部分提供四种电压:

1.  $3.6\text{ V}$  油滴照明电压:从插座(2-3)引出.

2.  $500\text{ V}$  直流工作电压:该电压可以连续调节,从数字电压表(5-1)上直接读出,并由工作电压反向开关(5-3)反向,以改变上、下电极板的极性,反向开关处于“+”侧时(上电极板为负极),能达到平衡的油滴带正电,反之带负电,反向开关处在“0”位置时,上、下电极板短路,并且不带电.

3.  $200\text{ V}$  左右的直流升降电压:该电压可通过升降电压反向开关(5-5)叠加(加或减)在平衡电压上,以控制油滴在视场中的上、下位置.升降电压高,油滴移动速度快,反之则慢.

4.  $12\text{ V}$  的 CCD 电源电压:CCD 电源插座(7-4)的中心电极为正极.

仪器的调节

1. 油滴仪的调节

1) 将工作电压反向开关(5-3)放在“0”位置.这时上、下电极板短路,并且

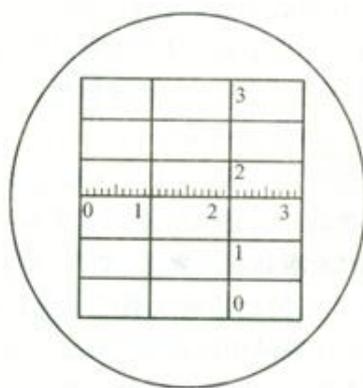


图 44-5 目镜头中的分刻板

不带电. 将油滴照明灯(2-1)插头插入3.6 V 照明灯电源插座(2-3).

2) 取下油雾室(1-3), 检查导光棒(2-2)是否插入胶木圆环上的进光孔中; 导光棒有没有把胶木圆环以及上电极板翘起来; 上电极板压簧(图44-4之4)是否和上电极板接触好, 并把上电极板压住. 放上油雾室, 并使喷雾口(图44-4之1)朝向右前侧. 打开油雾室的油雾孔开关(图44-4之2), 以便喷油. 注意: 因油雾室中的电极上带有数百伏电压, 调整仪器时, 如要打开有机玻璃油雾室, 必须先将平衡电压开关放在“下落”位置, 以免触电.

3) 将仪器放平稳, 调整左右两只调平螺丝(3-1), 使水准泡(3-2)指示水平, 这时油滴盒处于水平状态.

4) 打开电源开关. 从测量显微镜(4-1)中观察, 如果分划板位置不正, 则转动目镜头(4-2), 将分划板位置放正, 并将目镜头插到底. 调焦接目镜(4-3), 使分划板刻线清晰.

5) 在喷雾器中注入实验油少许, 将油从喷雾器旁的喷雾口喷入(一下即可), 微调测量显微镜的调焦手轮(4-4), 使油滴清晰成像在分划板上. 这时视场中的油滴如夜空繁星. 如果视场太暗, 油滴不够明亮, 或视场上、下亮度不均匀, 首先可转动油滴照明灯(2-1)的灯座, 使灯珠前面的聚光珠正对前方. 如果油雾不在视场中间范围, 偏在一边, 可取下油雾室(注意: 首先将平衡电压反向开关放在“0”位置), 转动上电极板试试.

6) 将工作电压反向开关(5-3)拨到“+”侧或“-”侧, 在平行极板上加200~300 V 左右的工作电压, 观察油滴的运动情况有无变化; 调节工作电压的大小(调节5-2)观察油滴的运动速度有无变化; 再加升降电压, 观察油滴的运动速度有无变化; 调节升降电压的大小(调节5-4), 观察油滴的运动速度有无变化.

## 2. CCD 电子显示系统的安装与调整

1) 将 CCD 托板(7-2)安装在 CCD 接筒(7-3)上.

2) 取下油滴仪目镜头(4-2), 调节接目镜(4-3), 使分划板聚焦清楚, 放入接筒中, 要放正.

3) 将 CCD 镜头装于 CCD 上.

4) 用视频电缆, 将 CCD 上的 VIDEO OUT 插座与监视器的 VIDEO IN 插座相连接. 监视器的阻抗开关置 75  $\Omega$ .

5) 用专用电源线, 将 CCD 上的电源插孔与油滴仪上的 CCD 电源插座(7-4)相连接.

6) 打开监视器电源, 即可看到模糊图像. 将 CCD 聚焦约 25 cm(明视距离), 使图像清楚.

7) 用专用螺丝将 CCD 固定在 CCD 托板上, 镜头要深入 CCD 接筒.

8) 将 CCD 接筒套在油滴仪的镜筒上, 喷油, 调整油滴仪显微镜焦距, 使油滴清晰、明亮。

### 实验任务

选择合适的油滴, 测量油滴匀速下降一段距离所需的时间, 求出油滴带电量的多少。

### 操作提示及操作程序编写

下面简单给出操作提示, 希望实验者根据这一提示编制出操作程序, 写出操作的细节。

1. 仪器调节。
2. 练习控制油滴。
3. 练习选择油滴。
4. 练习测量速度。
5. 用静态(平衡)测量法正式测量

由公式(9)可知, 进行本实验时实际上要测量的只有两个量, 一个是平衡电压  $U_n$ , 另一个是油滴匀速下降一段距离  $l$  所需要的时间  $t$ 。一般取  $l = 0.200 \text{ cm}$  比较合适。

由于有涨落, 对于同一颗油滴必须进行 10 次测量。同时还应该对不同的油滴(不少于 5 个)进行反复的测量。这样才能验证不同油滴所携带的电量是否都是电子电荷的整数倍。

已知:

油的密度	$\rho = 981 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$
重力加速度	$g = 9.794 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$
空气的粘度	$\eta = 1.83 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$
油滴匀速下降的距离取	$l = 2.00 \times 10^{-3} \text{ m}$
修正常数	$b = 8.22 \times 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{Pa}$
大气压强	$p = 1.013 \times 10^5 \text{ Pa}$
平行极板距离	$d = 5.00 \times 10^{-3} \text{ m}$

将以上数据代入公式(5)和(9)得

$$ne = \frac{1.43 \times 10^{-14}}{[t(1 + 0.02\sqrt{t})]^{3/2}} \cdot \frac{1}{U_n}$$

显然, 由于油滴的密度  $\rho$ 、空气的粘度  $\eta$  都是温度的函数, 大气压强  $p$  又随实验地点和条件的变化而变化。因此上式的计算是近似的。一般情况下, 由于它们引起的误差仅 1% 左右。而这样做可以使计算大为简化, 对测量准确度要求不高

时,此法是可取的.

由于学生是初次测量,测量误差可能要大些,要准确求出电荷的最大公约数有时比较困难,通常我们用倒过来验证的办法进行数据处理.即用公认的电子电荷值  $e = 1.60 \times 10^{-19} \text{ C}$  去除实验测量的电量  $Q$ ,得到一个接近于某一个整数的数值,这个整数就是油滴所带的基本电荷数目  $n$ .再用这个  $n$  去除实验测得的电量,即是电子的电荷值.

### 课堂讨论题

1. 如何判断油滴处在匀速运动状态?
2. 如何选择和控制待测的油滴?
3. 在测量油滴匀速下降一段距离  $l$  所需时间  $t$  时,应选取哪段  $l$  最合适?

### 阅读材料

#### 密立根(Robert Andrews Millikan)简介

密立根(Robert Andrews Millikan)教授是美国著名的物理学家、电子基本电荷的最先测定者,1868年3月22日出生于伊利诺伊州的莫里森,早年曾在衣阿华州的马可梯塔(Maquoketa)中学和俄亥俄州的奥伯林学院接受教育.1895年他从哥伦比亚大学获得哲学博士学位后,到欧洲的柏林大学和哥廷根大学继续深造.

1896年至1921年,密立根曾先后在芝加哥大学担任物理学的助理教授、副教授和教授.1921年底聘到加利福尼亚理工学院担任物理实验室主任,并主持学院的行政委员会,一直工作到40年代.1916年他还兼任国家研究委员会主席,1928年兼任美国科学进展协会会长.

密立根教授由于他用实验方法精确测量了电子的电量而闻名于世.1913年至1917年在芝加哥大学任教期间,他对带电油滴在相反的静电场和引力场之间的运动进行了实验观察,当两力处于平衡时,从观察外加电压、油滴的密度与下降的速度,发现了一个油滴所载的最低电荷  $e = 1.60 \times 10^{-19} \text{ C}$  和这个油滴所载的许多较高电荷的最小公倍值是一样的,表明氢比一个电子重1836倍.这一著名“油滴实验”曾轰动整个科学界,使得密立根扬名四海.1916年,密立根解决了光电效应的进一步精确测量问题,证实了爱因斯坦公式  $E = V_e e = hf - W$ ,而普朗克常数  $h$  第一次由光电效应加以计算.此外,还有一个很有价值的贡献,这就是他把光谱测量向远紫外线扩大到X射线区域附近,从而发现了“裸原子”(即高度电离的原子)和“自旋电子”的重要光谱.后来密立根还从事宇宙射线的广泛研究,并取得一定成果.为了研究宇宙射线,他与他的助手爬山越岭到处奔波.在很长的一段时间中,密立根一直坚持宇宙射线是电磁辐射的看法.

密立根教授因为对基本电荷和光电效应的研究而荣获1923年度诺贝尔物

理学奖金,同时他也是美国国立科学院柯姆斯托克奖金、美国电力工程研究所爱迪生奖章、大不列颠化学学会法拉第奖章和伦敦皇家学会胡格斯奖章的获得者。1929年由于宇宙射线的研究又获得美国艺术与科学学院授予的金质奖章以及其他方面各种奖励。他又是美国国立科学院院士、美国艺术与科学学院院士、美国哲学学会会员,以及外国各种科学学会的通讯院士或荣誉会员。还有好几个世界著名的大学授予他荣誉学位。

密立根教授从事教学科研的一生中,写过许多科学论著。主要著作有:1902年发表的《力学、分子物理学与热学》、1917年发表的《电子》、1935年发表的《电子(十、一)、质子、光子、中子与宇宙射线》、1939年发表的《关于宇宙射线的三篇报告》等。此外,他还与别人合著各种科学的教科书和有关哲学方面的著作。

作为一位生气勃勃的教育家,密立根教授一生中培养了许多有用的人才,1936年度的诺贝尔物理学奖金获得者卡尔·安德逊就是其中的一例。

### 创新园地

用油滴法测量电子的电荷,可以用静态(平衡)测量法和动态(非平衡)测量法。本实验采用的是平衡法。平衡法是在静电力  $QE$  和重力  $mg$  达到平衡后导出公式进行实验测量的。非平衡法则是在平行极板上加以适当的电压  $U$ ,但并不调节  $U$  使静电力和重力达到平衡,而是使油滴受静电力作用加速上升。试设计写出非平衡测量法测量电子电荷的原理、操作步骤、数据处理。

## 实验四十五 固体导热系数的测量

物体间的热量交换有三种形式(导热、对流、热辐射),其中的导热是指物体各部分之间不发生相对位移时,依靠分子、原子及自由电子等微观粒子的热运动而产生的热量传导过程。自由电子的运动在导电固体中的导热起着主要作用,而在非导电固体当中,导热则是通过晶格结构的振动,即通过分子、原子在其平衡位置附近的振动来实现的。

导热系数(又称热导率)是表征物质材料热传导的重要物理量,传热学的理论和实践告诉我们,某种物体的导热系数不仅与构成物体的材料有关,也与它们的微观结构有关,并且与温度、压力及杂质的含量相联系着。一般来说,在科学实验和工程的设计中,大多数材料的导热系数都需要用实验的方法确定。

1804年法国物理学家毕奥<sup>①</sup>通过平壁导热实验的结果最早的表述出了导热

<sup>①</sup> 毕奥(1774—1862) 法国物理学家、天文学家、数学家,著名的发现是与 F. 萨伐尔合作的关于直线电流磁场强度的定律(毕奥-萨伐尔定律)。著有《实验与物理学专论》等。

## 第五章 研究性实验

### 预备知识

#### 一、研究性实验阶段的教学安排

#### 二、物理实验课程论文的写作要求

## 第五章 研究性实验

### 预备知识

#### 一、研究性实验阶段的教学安排

研究性实验阶段计划学时 8, 预计课外学时 12~20。研究性实验阶段要经过选题、实验前的准备、实验操作、撰写课程论文和论文答辩等教学环节。下面对这五个环节分别做一简要说明。

##### 1. 选题

实验室提供二十余个研究性实验题目供学生选择。一般情况下, 实验题目与论文题目是一致的。有人说, 实验题目选好了, 等于实验成功了一半, 此话虽有夸张, 但应承认, 题目选得好, 实验就容易做出特色。选题的原则是: ① 符合自己的兴趣、爱好和特长; ② 有利于做出特色或取得创新性成果。选题之前, 必须认真地阅读教材和实验室提供的相关资料。首先是粗略的通读, 然后对自己感兴趣的题目进行精读。有学生问, 我只选做一个题目, 让我读二十个题目的资料, 时间不是白白浪费了吗? 其实, 花费一些时间进行通读是值得的。第一, 只有对所有题目有了全面的了解, 才能做出比较和选择; 第二, 研究性实验内容大多比较新颖, 比较贴近社会生产和生活实际, 有一些还涉及到当代前沿技术, 阅读这些资料可以扩大眼界, 增加知识的积累; 第三, 对于自己不大感兴趣的内容可以大致的翻一翻, 不必花费过多的时间。除阅读教材外, 还要到实验室进行实地考察, 增加感性认识。实验室的老师也会帮助你做出选择。

##### 2. 实验前的准备

###### 1) 搜集资料

实验前应做好两项工作: ① 搜集资料; ② 制定操作程序。

实验资料是实验研究的基础, 占有资料越多, 研究内容才能越深, 实验方法才能越新。在研究性实验阶段, 每人做一项实验, 提交一份课程论文, 可以说, 大家都是处在同一起跑线上, 谁能脱颖而出, 主要看谁占有的资料又多又精。为了搜集到有用的资料, 首先要读懂自己选做的实验教材的内容, 对教材中提出的问题能做出正确的回答。为了有所创新, 还应查阅课外资料, 如国内外的实验教材,

以及《物理实验》、《大学物理实验》、《实验技术与管理》和《物理与工程》等相关杂志,还可以去图书馆等图书情报部门进行文献检索.文献检索又分为手工检索和计算机检索.通过检索,既能收集到有用的资料,又能熟悉检索途径、学会运用检索工具来查找文献.

对收集到的资料还要进行整理.这些资料可分为三类:①可以帮助自己改进实验方法和操作程序;②可以用在论文写作中作为论点和论据;③也有些资料暂时用不上.应该把前两类资料分别记录在笔记本上待查.

### 2) 制定操作程序

这里的操作程序,是指为了完成实验课题所涉及的一套理论运用和实际操作.即为了获得实验成果而运用的原理及实施的步骤.在实验之前编制的操作程序大体上应包括如下内容:实验仪器的名称和型号、仪器的调节和使用方法、原理图、原理公式、实验步骤、数据表等.制定操作程序的目的是:①使实验过程能科学地、有条理地进行;②便于观测和记录;③备忘.

### 3. 实验操作

这是为了取得预期的实验成果而实施的实验过程.这一过程是决定实验成败的关键阶段,也是培养学生实践动手能力的有利时机.在实验过程中难免会出现故障,如仪器使用不当、操作错误等,这是主观原因;又如供电中断、仪器失灵等,这是客观原因.实验中出现故障是我们不希望的.但是,如果实验者能运用所学知识将故障排除,这将是一个十分难得的收获,也令人信服地证明了实验者分析问题和解决问题的能力在实践中得到了锻炼和提高.这正是物理实验教学始终追求的境界.

### 4. 撰写课程论文

实验操作完成后,要求每一位学生提交一份物理实验课程论文,作为研究性实验阶段的综合性作业.论文的成绩决定于三个因素:①实验任务完成的质量;②论文的写作水平;③论文答辩的效果.关于论文的写作要求,请参见本章第二节.

### 5. 论文答辩

物理实验课程论文公开答辩,是评审论文的重要方式,是对论文作者基本理论知识和实践能力的综合考核,并最终确定论文作者本门课程的学习成绩.作者自述论文及当场回答问题是论文答辩的主要形式,指导教师对作者阐述不清楚、不完善及不确切之处提出问题,论文作者应当场回答.公开答辩不仅考查论文的质量和水平,也考查论文作者的口头表达能力、演讲能力和应变能力等综合素质.论文答辩分两个层次:①小组答辩;②年级答辩.小组答辩,人数不宜过多,以十人左右为宜,在教师的主持下,小组成员依次自述论文.在此基础上,按3%的比例评选出校级优秀论文.当选论文的作者参加年级论文答辩.

答辩会上,作者自述时间为7~9分钟,回答问题3~5分钟.要把几千字的内容在几分钟的时间内阐述清楚,并不容易,事先要做好充分的准备:①写一份自述提纲,大约800~1000字,并根据提纲制作一份多媒体软件.该软件是为了配合自述发言时使用,画面要醒目,让全场观众都能看清画面上的内容.有的同学把自述提纲中所有内容都写进软件里,画面上密密麻麻布满了文字和图表,但受发言时间的限制,每个画面只能停留半分钟甚至更短的时间,谁也看不清屏幕上都写了些什么.一个好的多媒体软件,能起到提示、引导和吸引注意力的作用.②做好回答问题的准备.对于教师提出的问题,一般应在半分钟到一分钟的时间内回答完毕,因此语言要具有高度的准确性和概括性.对于同一个提问,有的人用两三分钟才说明白,有的人只用了一两句话就说清楚了.两者的效果是截然不同的.前者被认为是啰嗦,后者才称得上精彩.为了在答辩会上取得成功,需要做到:①自述发言富有说服力,多媒体制作精彩;②回答问题准确、简练.

教育部高教司的一位领导同志在全国实验室工作会议上指出:“实验课程论文的答辩,对于培养学生的实际动手能力和创新精神是很有帮助的.”<sup>[1]</sup>每一位同学都应积极参加论文答辩这一教学环节,全面培养和提高自己的综合能力和素质.

## 二、物理实验课程论文的写作要求

### 1. 引言

物理实验的研究性实验阶段采用研究式、答辩式的教学方法,学生在研究性实验阶段要做两件事,一是完成实验任务,取得预期的实验成果;二是提交一份课程论文,并在答辩会上宣读.只有取得优秀的实验成果,才能写出优秀的论文,但是有了优秀的成果,并不一定能写出优秀的论文.所以,学习和掌握一点科技论文的写作知识是十分必要的.

### 2. 学术论文的分类

学术论文可分为报刊学术论文、学位论文和学生论文三大类.

#### 1) 报刊学术论文

报刊学术论文是自然科学、社会科学和工程技术领域的专业人员撰写的学术论文.这类论文要求有较高的学术性和创新性,是专业人员取得成果和表现作者学术水平的具体体现.报刊学术论文的数量和质量是一个国家科技发展和学术繁荣程度的重要标志.

#### 2) 学位论文

学位论文是指学位申请者为了申请学位而提交的论文.依学位的高低又分为三种:①学士论文,指大学本科毕业生为申请学士学位而提交的论文.学士论文

应能反映出作者具有的专业基础知识和从事科学研究的实践能力,这种论文一般只涉及不太复杂的课题,大多数学士论文还达不到发表的水平。② 硕士论文,指硕士研究生为申请硕士学位而提交的论文。硕士论文是在导师指导下完成的,应具有一定的创新性,表现出作者的独立工作能力,相当数量的硕士论文已达到了可以发表的水平。③ 博士论文,指博士研究生为申请博士学位而提交的论文,它可以是单篇的论文,也可以是若干篇相关论文的组合。博士论文应能反映出该学科领域最前沿的独创性成果。博士论文被视为报刊学术论文的重要稿源。

3) 学生论文。学生论文是高等学校学生根据学校教学培养目标的要求,在教师指导下独立完成的总结性和专题性的大型作业,目的在于培养和提高学生综合运用所学知识去分析、解决实际问题的能力以及科技写作能力。学生论文又可分为课程论文、学年论文和专科毕业论文。物理实验课程论文,是学生完成物理实验课程的全部学习任务后提交的学生论文,旨在培养和评价学生基本物理实验知识、技能以及综合运用所学知识去解决实际问题的能力,也包括科技写作的能力。物理实验课程论文涉及的范围较窄,论述的深度也较浅,一般只限于基本物理实验方法的运用。绝大多数的课程论文还达不到发表的水平。近三年来,大连市某大学的学生共写出物理实验课程论文约一千八百篇,其中在省级以上刊物发表的仅五篇,比例虽小,但其意义不可低估,这说明了在学生中蕴藏着巨大的学习和创新的潜在能力等待我们去发掘。只要教学方法得当,物理实验课程论文的整体质量就可以有一个大幅度的提高。

### 3. 学习科技写作知识的意义

科技写作是科学研究的组成部分,是科技工作者必须掌握的基本技能。写作能力对科技工作者的重要性,主要表现在:① 科技写作水平的高低,会直接影响科技工作的进展。比如,一个很有价值的科研课题,若申请报告写得好,就会得到政府和社会的支持,若申请报告写得不好,必然要失去机会。② 科技写作本身就是科学研究的思维过程,在写作过程中,往往能对自己所研究的课题做出更深入地探讨,引起新的联想和思索,从而将科研工作推向新的阶段。③ 科技论文的质量和数量是衡量一位科技工作者学术水平高低、对社会贡献大小的公认的指标。现在在校的大学生是未来的科技工作者,对科技写作的重要意义一定要有足够的认识。我国著名物理学家严济慈<sup>①</sup>教授说:“在理工科大学开设科技写作课,对于培养高质量的科技人才是十分重要的。”早在 20 世纪 80 年代,国内不少院校

<sup>①</sup> 严济慈(1900—1996) 中国物理学家、中国科学院院士。1923 年于南京高等师范毕业,1927 年获法国国家科学博士学位。曾任中国科学技术学会副主席兼中国科技大学校长等职。对水晶在电场作用下的伸缩和光学性能的改变,氢、氘的连续光谱等问题做了专门研究,卓有成效。主要著作有《几何证题法》,《普通物理学》,《热力学第一和第二定律》等。

已经正式开设了科技写作课程。目前,很多高校在一些课程中安排了“撰写课程论文”这一教学环节。其中实验课程论文的教学效果尤为显著。祝愿同学们在研究性实验阶段能够写出一份高质量的课程论文。

#### 4. 课程论文的结构

根据1997年国家标准局颁布的《科学技术报告、学位论文和学术论文的编写格式》的要求,论文的结构包括数十项内容,其中最基本的内容有:题名、作者署名、摘要、关键词、引言、正文、结论、参考文献等。学生撰写的课程论文带有习作的性质,可参照上述要求做适当简化。实验成果是论文写作的基础,论文写作是实验成果的表达,由于实验课题不尽相同,实验成果也不尽相同,课程论文的结构也可以有所不同。作者应根据自己的实验成果,酌定论文的内容和结构。大体来说,物理实验课程论文的结构应包括如下内容:

##### 1) 文题

文题是论文的标题,确定文题时要遵循两条原则:第一条原则是文字要准确、恰当地反映实验研究的对象和范围,既不扩大也不缩小。曾有一位同学,他选做的实验内容是测量水的表面张力,可是文题却写成“水的性质的研究”,老师问他为什么这样写,他说为了吸引读者。其实,这种做法在“吸引”了读者的同时,也欺骗了读者。在写作过程中,作者难以保证文中无疏漏,但应保证文中无假货;第二条原则是文题不要过长,字数不要过多,一般不要超过二十个字。

##### 2) 作者署名

作者署名包括作者姓名、工作单位、邮编等。有的刊物还刊登作者简介。署名的作用有两条:一是便于读者检索或与作者取得联系;二是表明署名者拥有该作品的著作权。

##### 3) 摘要

科技论文必须附摘要,刊载于正文之前,这是交流和检索的需要。科技论文的种类繁多,内容丰富,读者拿到论文之后,不可能每篇都去通读。是否需要通读,除了从题名上进行判断以外,主要是根据摘要来决定。另外,科技论文发表后,文摘期刊社要对其整理,使之成为二次文献。摘要写得好不好,将直接影响二次文献的检索质量。我们要求在课程论文中附摘要,主要目的是为了学习摘要的撰写方法。摘要是对论文基本内容的浓缩,是不加评论的简短陈述。摘要应简短、精粹、完整,忠于原文,有足够的信息量。达到“多一字嫌浪费,少一字显不足”的境界,一般控制在二百到三百字之间。撰写摘要时,应该用第三人称,排除主观因素,不要做任何渲染和评价。

##### 4) 关键词

关键词是表达论文主题最重要的词、词组和短语。它的主要作用是便于读者按照主题途径查阅文献,提高文献检索效率。每篇论文遴选的关键词不宜过多,

三到七个即可满足需要。

### 5) 正文

物理实验的课程论文大体上可包括如下内容:实验原理、实验仪器与方法、实验结果与分析、结论等。

其中,实验结果与分析是课程论文的心脏部分,实验成败由此判断,一切议论由此引出,所以应充分说明,并引用表格、图解及照片等来帮助说明。对实验结果的判断和分析,要以数据为依据,用事实来说话。要尽量压缩那些人人皆知的议论,突出作者的新发现和新见解。大段的照抄书本是最不可取的。它说明了作者没有任何见解,也没有任何感受,只是人云亦云而已。

“结论”并非必须有。因为在“实验结果与分析”中已经有所报道。只有在下列情况下,才有必要专门设“结论”项:① 研究结果有重大学术价值;② 研究方法特别新颖;③ 结论与众不同。如要撰写结论,则应做到:① 观点明确,措辞严谨,不能模棱两可;② 行文要简短,不要展开讨论;③ 不做自我评价。

### 6) 参考文献

作者在撰写论文时,总要引用他人研究成果中的观点、数据等,被引用的文献应列在正文之后,组成参考文献表。著录参考文献的主要目的是:① 反映作者的科学态度和论文的科学依据;② 表明作者对他人研究成果的尊重,也避免了抄袭和剽窃的嫌疑;③ 节省文章的篇幅。参考文献的著录格式应严格执行 GB7714—87《文后参考文献著录规则》,课程论文中被著录的参考文献主要有连续出版物和学术著作两类,这两类文献的著录项目略有不同:

对连续出版物,著录项目有:

顺序号 作者. 题名. 刊名, 出版年份. 卷号(期号):起止页码. 例如,

1 刘凤泰. 关于实验教学改革的问题. 实验技术与管理, 2000. 17(4): 6~10

对学术著作,著录项目有:

顺序号 作者. 书名. 出版地:出版者, 出版年. 起止页码. 例如,

1 黎德华等. 家用电器教程. 贵州:广西师范大学出版社, 1992. 117~123

### 5. 撰写课程论文的步骤

撰写课程论文大体上要经过整体构思、拟订提纲、论文起草、反复修改、最后定稿等阶段。

#### 第一步:整体构思

整体构思就是打腹稿。主要是构思文章的总体结构,拟在文章中说明什么论点,用哪些论据进行说明和论证,如何进行文章的布局,各种数据和图表如何进行穿插等,在脑子里要大致勾画出一个比较清晰的轮廓。最重要的是突出主题。所谓突出主题,就是突出自己的研究成果。有一位同学在“测温电桥”实验中主要取得了两项成果:一是完成了电路的设计和组装;二是在调节等臂电阻的过程

中,创造了一种比较新颖的方法,既简化了设备,又节省了时间.这位同学在构思的过程中,面临三种选择:其一,两个成果都写;其二,主要写第一个成果;其三,主要写第二个成果.指导教师在帮助他分析时指出:前两种写法是可以的,但缺点是,第一种写法主题不突出,第二种写法缺乏特色.而第三种写法,主题突出,特色鲜明,因为这种写法突出了作者的独创性成果.该同学接受了老师的建议,写出了一篇较好的课程论文,后来被全国核心刊物《物理实验》杂志录用发表<sup>[2]</sup>.

#### 第二步:拟订提纲

拟订提纲就是搭框架.这是对整体构思的具体实施.框架搭得合理,文章的逻辑性就强.这一步要求详细列出文章的各级标题,并为每一个标题准备好素材,也就是要求拟订一个完整的写作提纲.

#### 第三步:论文起草

论文起草就是打草稿,也叫写初稿,这是写作过程最艰辛的阶段.写初稿就是按照写作提纲,把作者的思想观点准确的表达出来.在写作过程中,应该放开去写,一气呵成,不必过多的考虑个别结构、个别词句是否完全合理和科学,把认为有价值的材料尽可能多的写入文中,以增加论文的信息量,为论文的修改奠定基础.一般情况下,在修改论文时,将多余的内容删去比较容易,而要临时增补新的内容则会困难一些.

#### 第四步:反复修改

论文初稿写好之后,还要进行反复多次的修改和加工,在草稿上进行精雕细琢,这一步是追求完美和精彩的阶段,也是喜获丰收的阶段,作者的心情是十分愉悦的,正所谓“反复推敲出佳句,精心修改得华章”.在修改时,一方面应琢磨论文的主题、论据是否合理,另一方面还要在语言上进行精心修饰和加工,字斟句酌,直到自己满意为止.

#### 第五步:最后定稿

定稿后,就可以誊稿或打印了.字迹要清晰,文面要整洁,标点符号要正确,图表要规范.

### 6. 课程论文写作中应避免的事项

课程论文中常见的毛病是:

1) 千篇一律.由于低年级学生的基础知识和实验技能储备不足,要求每一篇论文都能写出创新性成果是不现实的.但是,根据自己的实验成果写出自己的特色,却是每位同学都能做到的.比如在实验中寻找一两个自己感兴趣的问题进行深入地讨论,自然能形成自己的特色;或者论述一下做完实验的心得体会,也能写出自己的特色.在一定意义上可以说,写出特色就是创新.不少同学不愿意独立思考,大段大段的照抄教材,何谈特色.培根说过:“写作使人严谨.”撰写课

## 实验四十七 电饭锅温度控制电路的设计与组装

实验四十七 电饭锅温度控制电路的设计与组装 341

程论文的过程,就是作者思维能力得到锤炼与提高的过程。今天,我们撰写课程论文,不远的将来,我们要撰写学位论文,更远的将来,我们还要撰写报刊学术论文。也许,我们的一生都离不开科技写作。要想培养和提高自己的写作能力,应从写好课程论文开始。

2) 文面不整。主要表现在:其一,笔画不清,难以辨认;其二,随意涂抹,稿面脏乱;其三,插图和表格不规范。造成这种现象的直接原因,可能是作者为了节省时间,孰不知,这样的文稿传到教师或编辑的手里时,作品会遭遇一定的麻烦,作者的自我形象也肯定会受到一定的损害。这种做法既是对他人的不尊重,更是对自己的不尊重。真正受到损害的,还是作者本人。

3) 随意涂改数据。某些同学为了得到“理想”的结果,不惜任意涂改数据,或者抄袭他人的数据。这种行为,轻者说是投机取巧,重者说就是欺骗。这种错误,对青年学生的影响是十分长远的,如不改正,迟早要为此付出沉重的代价。学生在校期间,不仅要努力学习科学文化知识,更要培养自己尊重事实,坚持真理的科学精神,坚决摒弃一切弄虚作假的反科学的不良行为。

### 参考文献

- 1 刘凤泰. 关于实验教学改革的问题. 实验技术与管理, 17(4): 2000. 6~10
- 2 丁倩华. 热敏电阻温度计组装实验中电阻调节方法的改进. 物理实验, 2002. (增刊): 61~62

## 实验四十七 电饭锅温度控制电路的设计与组装

随着社会的发展和科技的进步,电气炊具已进入寻常百姓家,如电饭锅、电烤箱、电磁灶、微波炉等。按加热工作原理,电气炊具可分为电阻式、红外式、感应式和微波式。电饭锅属电阻式。本实验要求学生深入了解保温式自动电饭锅的工作原理,对温控电路的设计思想有一感性认识,在教材的提示下能独立设计出温度控制电路,并用所给出的器件连接出温控电路,完成实验,还能对电饭锅的常见故障做出诊断。

### 实验原理

#### 1. 保温式自动电饭锅的工作温度曲线

将米煮成香嫩可口的米饭,必须掌握好火候。煮饭大体包括低温吸水、旺火加热、维持沸腾、减火焖饭等过程。为了实现这一过程,必须对锅内的温度进行合

理控制. 图 47-1 是电饭锅内的温度变化曲线.  $A$  是煮饭起点, 此时锅内的温度是  $T_A$ , 煮饭开始后, 温度沿  $AB$  曲线上升至  $T_B$ ,  $T_B$  的温度一般为  $103 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ , 这时锅内已是饭熟水干, 应该停止升温, 这一功能是由限温开关来完成的. 此后锅内的温度沿  $BC$  曲线下降, 当降到  $T_C$  时, 即要阻止温度继续下降, 又要阻止温度再次上升, 要使温度维持在  $T_C$  附近,  $T_C$  为  $75 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$ , 这一功能是由保温开关来完成的.

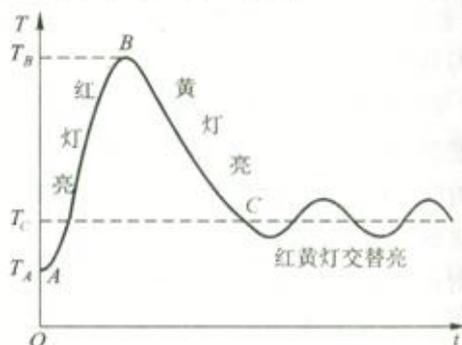


图 47-1 电饭锅工作温度曲线

## 2. 电饭锅的基本结构及工作原理

保温式电饭锅的结构如图 47-2 所示. 主要有外壳 3、内锅 2、电热盘 4、磁钢限温器 7 和双金属片保温器 6、指示灯 9 等部件组成.

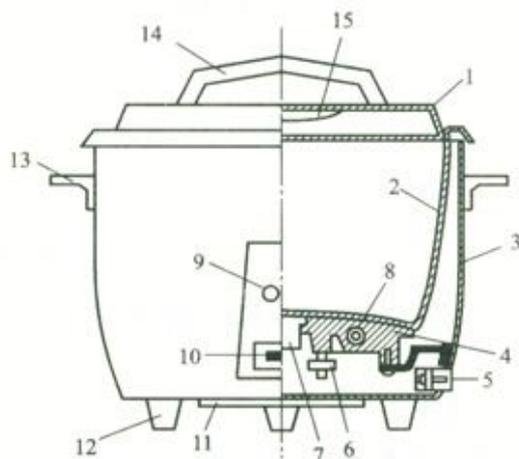


图 47-2 保温式自动电饭锅的结构图

1. 锅盖 2. 内锅 3. 外壳 4. 电热盘; 5. 电源插座 6. 双金属片保温器 7. 磁钢限温器  
8. 管状电热元件 9. 指示灯 10. 开关按键 11. 底盖 12. 支脚 13. 把手 14. 提手 15. 球面玻璃

### 1) 外壳

外壳通常用  $0.6 \sim 1.2 \text{ mm}$  的冷轧钢板一次拉伸成型. 外壳内下半部分安装着电热盘、磁钢限温器和双金属片保温器、电源插座等, 侧面安装有指示灯、开关按键等.

### 2) 内锅

内锅是电饭锅盛煮米饭的容器,可以随意放入和取出,它由厚 $0.8 \sim 1.5 \text{ mm}$ 的铝合金板一次拉伸成型,底部加工成球形凹面状,以便同球形凸面状的电热盘紧密吻合,二者之间不留空隙,以提高传热效率,内锅与外壳之间留有一定空间,作为保温层。

### 3) 电热盘

电热盘是电饭锅的发热元件,它的内部结构如图 47-3 所示,主要由铝盘 2 和电热管 1 两部分组成,电热管内装螺旋状电热丝(未画出)。制造电热盘时,先放入圆环状金属电热管 1,然后浇注铝合金,再经机械加工而成,其上表面加工成凸球面,以便与内锅底紧密吻合,电热盘的中央有一圆孔 3,用来安装磁钢限温器,底部设置电热丝引出棒 4,双金属片保温器安装螺孔 5。

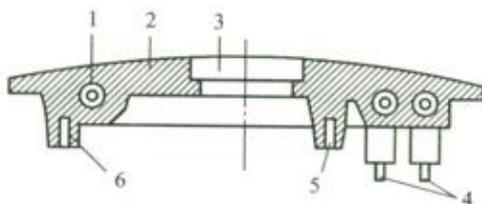


图 47-3 电热盘的结构示意图

1. 电热管 2. 铝盘 3. 磁钢限温器安装孔; 4. 引线棒 5. 保温器安装螺孔 6. 支承脚

### 4) 磁钢限温器

磁钢限温器是电饭锅的限温元件,安装在电热盘中心孔内,它的作用是控制电饭锅的温度,使其限制在图 47-1 中的  $T_b$  以下,保证煮熟的米饭不糊锅底。磁钢限温器的结构及安装图见图 47-4,主要包括感温磁钢 15、永久磁钢 16、内弹簧(压簧)13、与永久磁钢连动的拉杆 9 和杠杆 8 以及通过杠杆控制的动触点 5 和静触点 4 所组成。在常温下,按下限温开关的按键 1,使永久磁钢与感温磁钢吸合,拉杆和杠杆整体上移,如图中实线位置,动触点与静触点接触,此时开关闭合,电热丝通电。由于感温磁钢的磁化强度与温度有关,其磁化强度随着本身的温度升高而减小,当温度上升到一定温度时,感温磁钢的磁化强度急剧下降到零,这个温度称为磁性材料的居里<sup>①</sup>点温度。感温磁钢的这一特性,将使永久磁钢与感温磁钢吸合力随着内锅温度上升而减小,当温度上升到  $T_b$  时,两磁钢间吸合力小于内簧弹力与永久磁钢重力之合力,永久磁钢下落,带动杠杆动作,使

<sup>①</sup> 居里(1859—1906) 出生于巴黎的一个医生家庭,18岁获物理学硕士学位,他与其兄共同发现了石英晶体的压电现象。早年研究电磁学,发现了铁磁物质加温高于某一温度时,便失去了铁磁性,后来把这个转变温度称为居里点。居里与居里夫人一起研究放射性现象,1903年与贝克勒尔、居里夫人共同获诺贝尔物理学奖。

动触点离开静触点,如图中虚线所示,从而切断煮饭电流,达到限温的目的。动静触点一经分离,即使环境温度下降到使感温磁钢恢复磁性后,也不会自动恢复到互相接触的状态。要想重新吸合,必须人工再按下限温开关的按键1。

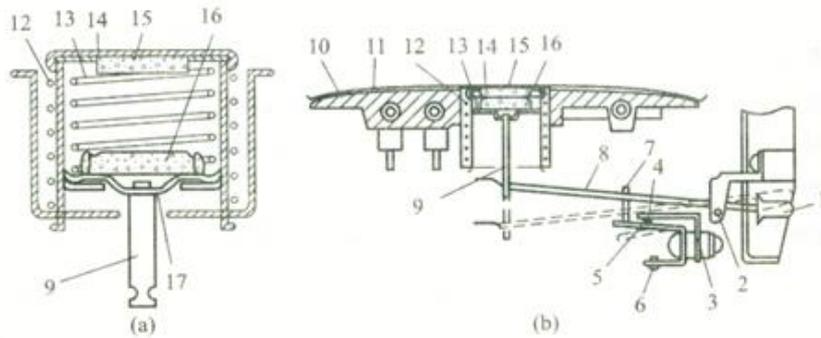


图 47-4 磁钢限温器的结构及安装图

1. 限温开关的按键 2. 转轴 3. 开关 4. 静触点 5. 动触点 6. 接线螺钉 7. 绝缘压板 8. 拉杆  
9. 拉杆 10. 电热盘 11. 内锅底 12. 外弹簧 13. 内弹簧(压簧) 14. 铝片 15. 感温磁钢  
(软磁体) 16. 永久磁钢(硬磁体) 17. 行程盘

### 5) 双金属片保温器

由于磁钢限温开关断开后不能自动吸合复位,为了使内锅的温度不低于图 47-1 中的  $T_c$ ,应在限温开关处并列一个保温开关,这个开关在温度高于  $T_c$  时应断开,低于  $T_c$  时应接通,这样就达到了保温的目的。这个开关的动作是由双金属片保温器控制的。图 47-5 为双金属片保温器结构示意图。双金属片由膨胀系数不同的合金片热轧而成,上层合金片称主动层,膨胀系数大;下层合金片称被动层,膨胀系数小。在常温下,双金属片处于平直状态,动静触点紧密接触,电饭锅接通电源后,电热盘开始发热,温度升高,双金属片受热使主动层比被动层长,从而产生弯曲变形,瓷柱 2 下移的同时还要向左倾斜,使动触点 14 上移。当温度达到  $T_c$  时动触点上移完全离开静触点 13,切断电源;当温度下降时,双金属片逐渐恢复原状,此时,动静触点重新接触,再次接通电源。此后不断重复这一过程,这样就实现了保温的目的。旋转调温柱 5 中的温度校准螺丝 6,可通过瓷顶针 4 调节簧片的弹力,决定动静触点离开的温度。电饭锅的保温温度定在  $75 \pm 5^\circ\text{C}$ ,出厂前已调整好,用户不应重新调整。

### 6) 指示灯与其他元件的电路连接

指示灯与其他元件的连接对电路设计十分重要。常用的指示灯为氖泡,当氖泡上加的电压大于它的起辉电压时即可点亮,其限流电阻常用  $120\text{ k}\Omega$ 。电热丝的内阻约为  $100\ \Omega$ ,限温开关和保温开关闭合时其接触电阻为  $0\ \Omega$ ,图 47-6 绘

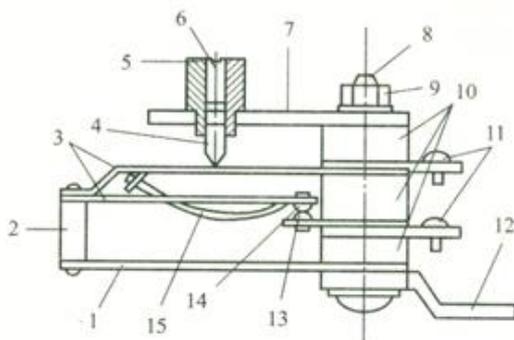


图 47-5 双金属片保温器结构示意图

1. 双金属片 2. 瓷柱 3. 簧片 4. 瓷顶针; 5. 调温柱 6. 温度校准螺丝 7. 支板 8. 螺钉  
9. 螺母 10. 瓷环 11. 接线螺钉 12. 支架 13. 静触点 14. 动触点 15. 储能簧片

出了几种指示灯的连接电路,图中 D 为指示灯(含氖泡与其限流电阻), $R$  为电热丝, $S$  为手动开关。

a) 指示灯与开关并联,如图 47-6(a)。当  $S$  断开时,指示灯亮,当  $S$  闭合时,指示灯不亮。

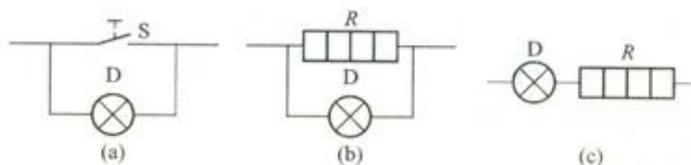


图 47-6 指示灯与其他元件的电路连接

b) 指示灯与电热丝并联时,如图 47-6(b),电热丝和指示灯都能正常工作。

c) 指示灯与电热丝串联时,如图 47-6(c),指示灯能正常工作,而电热丝只有微弱电流,不能正常工作。

在电饭锅温度控制电路的设计中,巧妙地运用了这些连接方法。

### 实验任务

1. 模拟图 47-1 所示温度和指示灯的变化要求,设计自动控制电路。
2. 连接电路。
3. 检验该电路的工作过程,看其是否符合设计要求,并作出评价。

### 实验条件

实验装置如图 47-7 所示. 为了增加实验装置的开放性, 把磁钢限温器、双金属片保温器、指示灯等从电饭锅中拆解下来, 将它们倒置, 固定在电加热盘上面. 为了增加安全性, 实验装置操作面板的电源用 24 V 交流电. 为了操作方便, 将各部件的接线端引到实验装置的操作面板上, 操作面板见图 47-8. 操作面板有六对接线柱, 工作指示灯为红色, 保温指示灯为黄色.

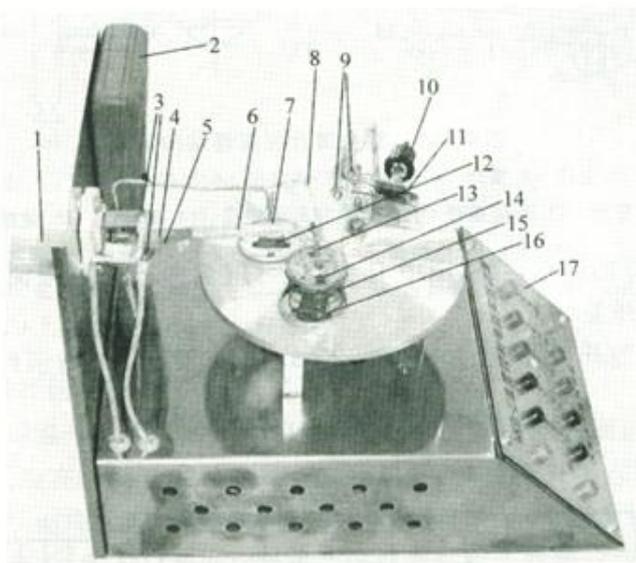


图 47-7 温度控制电路实验装置

1. 限温开关的按键 2. 数显温度计 3. 限温开关的引线端 4. 限温开关的动触点 5. 限温开关的静触点; 6. 限温开关的杠杆 7. 热电偶测温头 8. 电加热盘 9. 保温开关的引线端 10. 保温开关的温度调节旋钮 11. 保温开关的双金属片 12. 感温磁钢 13. 限温开关的拉杆 14. 限温开关的永久磁钢 15. 限温开关的内弹簧 16. 限温开关的感温磁钢 17. 操作面板

图 47-7 中热电偶测温头 7 固定在感温磁钢 12 表面上, 用来测限温开关或保温开关断开时的感温磁钢的温度. 由于限温磁钢固定在电加热盘的上表面, 所以当限温开关或保温开关断开时, 电加热盘 8 温度高于感温磁钢 12 的表面温度, 开关断开后电加热盘的温度还要向感温磁钢传递一段时间, 温度计温度要上升一段, 然后才下降.

图 47-9 为本实验装置所用电气元器件的符号. 限温磁钢开关  $S_1$  是手动闭合自动复位的常开开关; 双金属片保温开关  $S_2$  是常闭开关; 指示灯所串联的电

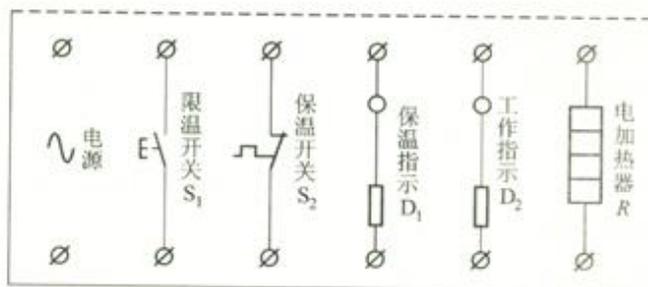


图 47-8 操作面板图

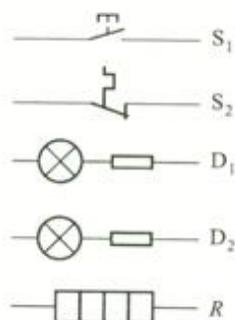


图 47-9 电气元器件的符号

$S_1$ —限温磁钢开关  $S_2$ —双金属片保温开关  $D_1$ —黄指示灯及其限流电阻

$D_2$ —红指示灯及其限流电阻  $R$ —电加热器

阻为指示灯限流电阻,起保护作用。

### 方法提示

1. 电加热器与开关串联后接入电源,绝对不可把电加热器与开关并联,或者不接开关直接将电加热器接入电源。

2. 图 47-10 提示电路中, $S_1$  闭合,则  $D_2$  和  $R$  同时工作,即红灯亮、电加热盘升温,当升温到接近  $T_B$  时, $S_1$  自动断开,从而使  $R$  断电。由于电热丝有余热,电加热盘温度还要持续上升一段后开始下降,基本符合图 47-1.  $AB$  段工作曲线的设计要求。但温度下降到  $T_C$  时,不能保温而要继续下降,直到室温为止。这里要解决两个问题,一是在  $BC$  段温度下降时虽然红灯灭了,但黄灯应当亮,黄灯应放在图 47-10 中什么地方? 二是温度下降到  $T_C$  时,如何再次让  $R$  通电? 这个保温开关应放在图 47-10 中什么地方? 借鉴图 47-6 中的连接方法,可以解决这两个问题。实验后考虑:电加热器在加热与保温两种状态下实际起着什么作用?

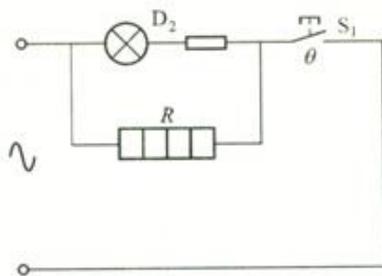


图 47-10 提示电路

### 阅读材料

#### 铁磁质的饱和磁化强度 $M_s$ 与温度 $T$ 的关系

自然界物质大致可以分成:铁磁性材料、顺磁性材料、抗磁性材料。电饭锅中的磁钢限温器采用镍锌铁氧体作感温磁钢,镍锌铁氧体为铁磁性材料。研究铁磁性材料的磁化强度  $M_s$  与温度  $T$  的变化规律,为铁磁性材料的应用提供了理论依据。其中磁介质的磁化强度  $M$  是从分子电流观点对磁介质的磁化状态进行描述的物理量,定义为单位体积内分子磁矩的矢量和。每种铁磁性材料的饱和磁化强度  $M_s$  在某一温度下是一常数。

在室温下能显示铁磁性的物质,加热到某一温度以上就会变成顺磁性,从铁磁性转变成顺磁性的温度称为居里点或居里温度。

铁磁材料的饱和磁化强度  $M_s$  一般随着温度的升高而减小,在居里点附近急剧地减小为零。图 47-11<sup>①</sup> 给出了铁磁质的饱和磁化强度  $M_s$  与温度  $T$  的关系,表示了这种变化的大致情况。图中纵坐标为  $M_s/M_{s0}$ ,  $M_{s0}$  为绝对温标  $T=0\text{K}$  时的  $M_s$ ,横坐标为  $T/(\mathbb{H})_f$ ,  $(\mathbb{H})_f$  为铁磁性材料的居里点温标。

铁磁材料又可细分为铁磁性、亚铁磁性、弱铁磁性三种,常用的是铁磁性或亚铁磁性材料。铁氧体材料是亚铁磁性材料。从图 47-11 看出,对于铁磁材料  $M_s/M_{s0}$  与温度的关系几乎和物质种类无关,曲线形式相同,而对于亚铁磁材料,其形式要复杂些,但大体分为四种。

### 创新园地

1. 请将你设计的电饭锅温度自动控制电路增加一个延时通电的功能。比如,某用户早 7:30 把米和水放入内锅中,插上市电插座,然后去上班。他希望电饭锅在 11:30 能自动通电煮饭,12:00 回家时米饭刚刚煮好。请问这个电路应该

<sup>①</sup> 引自《应用磁学》第 10 页。

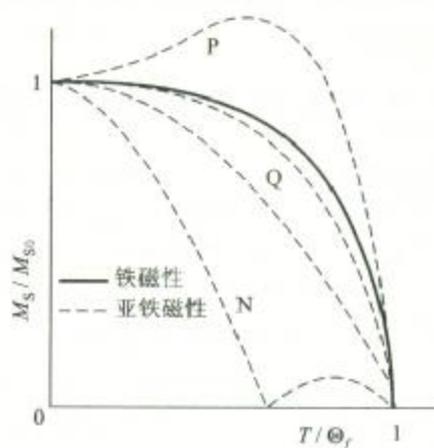


图 47-11 铁磁质的饱和磁化强度与温度的关系

怎样改进?

2. 请针对电饭锅常见故障进行思考,然后在表 1 中的空格处填写适当的文字。

表 1 电饭锅常见故障简表

故障现象	可能存在的原因	处理方法
指示灯不亮	1. 电源未接通 2. 指示灯坏	1. 用万用表检查插座插头开关等 2. 更换指示灯
指示灯亮, 电热盘不热	1. 电热丝引线断开 2. 电热丝内部开路	
加热盘只能达到 70℃,饭煮不熟	(写出两个可能的原因)	
糊锅底	(写出两个可能的原因)	

### 参考资料

- 1 杨尚威. 家用电器. 北京: 高等教育出版社, 1998. 112 ~ 117
- 2 黎得华等. 家用电器教程. 贵州: 广西师范大学出版社, 1992. 118 ~ 121
- 3 时继功. 现代厨房用器使用与维修. 北京: 人民邮电出版社, 1998
- 4 [日]内山晋等著, 姜恩永译. 应用磁学. 天津: 天津科学技术出版社, 1982. 7. 8 ~ 11

## 实验五十一 热敏电阻温度计的设计安装和使用

实验五十一 热敏电阻温度计的设计安装和使用 365

3. 干燥管和毛细管:干燥管内装有吸湿剂,用于滤除制冷剂中可能存在的微量水分和杂质,防止在毛细管中产生冰堵塞或脏堵塞。

内径小于 0.2 mm 的毛细管用于制冷剂节流膨胀,产生焦耳-汤姆孙效应。

4. 压缩机和交流安培表:压缩机压缩制冷剂使其压力由低变高。交流安培表用于监测压缩机的工作电流,当电流大于 1.5 A 时制冷系统可能有堵塞情况发生。

$S_1$  为压缩机电源开关;“ $I_{\text{电}}, U_{\text{电}}, *$ ”三个接线柱用于连接测量压缩机电功率  $P_{\text{电}}$  的功率表。

### 方法提示

1. 准备实验时应注意,在杜瓦瓶中盛三分之二深度、浓度为 50% 的含水酒精,未盛液体前切勿加热,以免烧坏加热器。

2. 本实验系统的冷冻室温度  $t_0$  最低可达  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  左右,学生实验时因受学时限制,一般可从  $5\text{ }^{\circ}\text{C}$  左右做起,每降低约  $5\text{ }^{\circ}\text{C}$  测一组数据,直到  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  左右,共六组数据。

对不同性质、不同充注量的制冷剂,不同种类、不同数量的冷冻物,特别是不同的环境温度,实验结果都不同。

3. 实验时,学生切勿扳动实验装置上的任一部件和仪器背后的制冷剂充注阀,以免造成制冷剂泄露而损坏仪器。

4. 压缩机停机后不能立即启动,再次启动要相隔五分钟。要经常注意电流表的指示值,当指示值急剧增大并超过 1.5 A 时,要停机检查是否有堵塞情况发生。

5. 测量时,要等温度充分稳定后(可从冷冻室温度  $t_0$  判断),再记录数据。

### 参考资料

1 郭明新,李朝荣.基础物理实验.北京:北京航空航天大学出版社,1998.9

## 实验五十一 热敏电阻温度计的设计安装和使用

利用热敏电阻作为感温元件,并且配有温度显示装置的温度测量仪表称为热敏电阻温度计。热敏电阻能把温度信号变成电信号,从而实现了非电量的(电测法)测量。值得提出的是,电量测量是现代测量技术中最简便的测量技术,不仅测量装置简单、造价低、灵敏度高、而且容易实现自动测量和自动控制,是测量技术的一个重要发展趋势。

本实验要求学生根据实验室提供的条件,设计和安装一台热敏电阻温度计,并对这台温度计的测量误差进行简要地测试和评价。

## 实验原理

### 1. 负温度系数热敏电阻的温度特性

热敏电阻按其温度特性可分为正温度系数型、负温度系数型及开关型三大类。其中负温度系数热敏电阻器是以锰、钴、镍、铜和铝等金属氧化物为主要原料,采用陶瓷工艺制成。这些金属氧化物都具有半导体性质,温度低时,载流子数目小,因此阻值高;温度升高时,载流子数目急剧增加,因此阻值急剧下降,如图 51-1 所示,其方程可表示为:

$$R_t = Ae^{\frac{B}{T}} \quad (1)$$

式中  $A$ 、 $B$  是与材料有关的常数。由式(1)看出,  $R_t$  是  $T$  的单值函数,只要测出阻值  $R_t$  的变化就能推测出温度  $T$  的变化。

### 2. 非平衡电桥

非平衡电桥电路如图 51-2 所示,当  $R_1 = R_2$  (对称电桥) 及  $R_1 = R_3$  时,电桥平衡,  $G$  指零。如果  $R_t$  的阻值发生变化,则电桥的平衡条件被破坏,  $G$  中就有电流通过,指针发生偏转,偏转越大,说明  $R_t$  变化也越大。

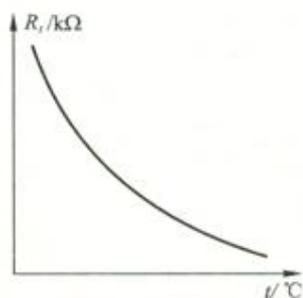


图 51-1 负温度系数热敏电阻的温度特性

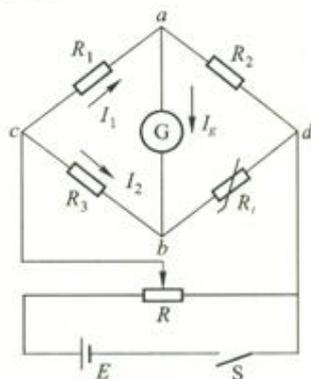


图 51-2 非平衡电桥

根据桥路的基尔霍夫方程:

$$\begin{cases} I_1 R_1 + I_g R_g - I_2 R_3 = 0 \\ (I_1 - I_g) R_2 - (I_2 + I_g) R_t - I_g R_g = 0 \\ I_2 R_3 + (I_2 + I_g) R_t = U_{cd} \\ R_1 = R_2 \end{cases}$$

解出 
$$I_g = \frac{(R_3 - R_1)U_{cd}}{2(R_g R_3 + R_3 R_1 + R_1 R_g) + R_1(R_3 + R_1)} \quad (2)$$

由式(2)看出,在  $R_1$  ( $R_2$ )、 $R_3$ 、 $R_g$  及  $U_{cd}$  恒定条件下,  $I_g$  的大小唯一由  $R_t$  值来决定,因而有可能根据 G 偏转的大小来直接指示温度的高低。

### 3. 热敏电阻温度计的实验电路

如图 51-3 所示,温度计的实验电路与图 51-2 所示的原理图相比有三点不同:

(1) 增加一个发光二极管 LED, 作为电源指示, 它的工作电压为 2~3 V。

(2) 检流计 G 换成微安表头。

(3) 最重要的改动是在  $bd$  支路中增加一个“校准”支路, 当  $S_2$  扳至“校”时, 温度计处于“校准”状态, 当  $S_2$  扳至“测”时, 温度计处于“测量”状态。  $S_2$  是该仪表的状态选择开关。

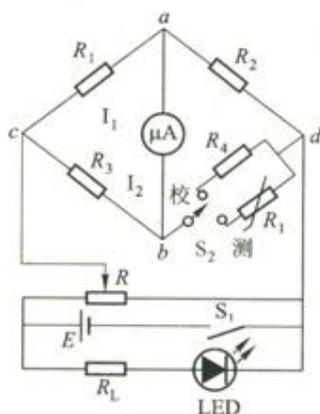


图 51-3 热敏电阻温度计的实验电路图

### 4. 电路参数的设计与计算

图 51-3 电路中需要设计计算的参数有四个, 下面分别介绍:

#### (1) $U_{cd}$ 的确定

$U_{cd}$  是桥路的工作电压, 既不能过高, 也不能过低。过高会使  $R_t$  产生自热现象, 从而使被测环境的温度升高; 过低则无法使微安表达到满偏。根据本实验中所用  $R_t$  的额定工作电流及微安表的量程,  $U_{cd}$  可在 1.1~1.4 V 之间确定一个值, 如 1.1 V, 1.2 V, 或 1.3 V。

#### (2) $R_3$ 值的确定

$R_3$  的大小与温度计的下限  $t_1$  有关。若测温范围是由  $t_1$  到  $t_2$ , 则  $t_1$  为下限,  $t_2$  为上限。热敏电阻作为感温元件, 放在下限温度  $t_1$  的温度场中, 它的阻值为  $R_{t_1}$ , 放在上限温度  $t_2$  的温度场中, 它的阻值为  $R_{t_2}$ ,  $R_{t_1}$  和  $R_{t_2}$  都可以在热敏电阻的温

度特性曲线上查到. 确定  $R_3$  大小的原则是, 当热敏电阻处于  $t_1$  温度时, 微安表应指零. 这样, 在  $R_1 = R_2$  的条件下,  $R_3$  必须等于  $R_{t_1}$ .

$$\text{即} \quad R_3 = R_{t_1} \quad (3)$$

### (3) $R_1$ ( $R_2$ ) 的确定

在非平衡电桥的参数设计中, 一般都是使  $R_1$  与  $R_2$  相等, 构成一个对称电桥. 另外,  $R_1$  ( $R_2$ ) 的大小与许多因素有关, 比如测量范围, 微安表的内阻  $R_g$ , 微安表的量限  $I_{gm}$ , 桥路的工作电压  $U_{cd}$  等.

若温度计的测温上限为  $t_2$ , 在这一温度下, 热敏电阻的阻值为  $R_{t_2}$ , 微安表应满偏

$$\text{即} \quad \begin{cases} R_1 = R_2 \\ I_g = I_{gm} \end{cases} \quad (4)$$

将式(3)、(4)代入式(2)中得

$$I_{gm} = \frac{(R_{t_1} - R_{t_2})U_{cd}}{2(R_g R_{t_1} + R_{t_1} R_{t_2} + R_{t_2} R_g) + R_1(R_{t_1} + R_{t_2})} \quad (5)$$

$$\text{由式(5)得} \quad R_1 = \frac{(R_{t_1} - R_{t_2})U_{cd}}{(R_{t_1} + R_{t_2})I_{gm}} - \frac{2(R_g R_{t_1} + R_{t_1} R_{t_2} + R_{t_2} R_g)}{R_{t_1} + R_{t_2}} \quad (6)$$

上式中的  $R_g$  和  $I_{gm}$  由实验室给出.

### (4) $R_4$ 的确定

给温度计通电进行温度测量前, 必须将  $S_2$  扳至“校”, 目的是校准工作电压  $U_{cd}$ , 使其刚好等于设计值. “校”的目的也是为了校准刻度值, 使  $R_1 = R_2$  时,  $I_g = I_{gm}$ , 与式(4)相符. 一般作法是将  $R_4$  的值固定为  $R_{t_2}$ , 这样, 当  $S_2$  扳至“校”时, 就相当于把感温元件置于温度为  $t_2$  的温度场中, 此时微安表应满偏. 如果未能指向满偏, 则说明  $U_{cd}$  未能达到设计值, 需仔细旋转电位器  $R$  的旋钮, 直至微安表满偏. 这一步完成后, 才能将  $S_2$  扳至“测”, 进入测量状态.

### 5. 制作定标曲线

将电路中各元件按图 51-3 安装完后, 就可以进行温度测量了. 但微安表指示值是电流值而不是温度值. 怎样才能通过微安表的偏转来读出相应的温度值呢? 办法之一就是通规定标实验来描绘出一条定标曲线, 如图 51-4 所示. 有了定标曲线, 就可以找到与任一电流值  $I_g$  相对应的温度值  $t_1$ , 或者根据定标曲线, 在刻度盘上直接按温度来标定. 这样, 指针的偏转既能显示电流值, 又能显示温度值.

### 6. 测温操作程序

使用该热敏电阻温度计测温, 应按下述程序操作:

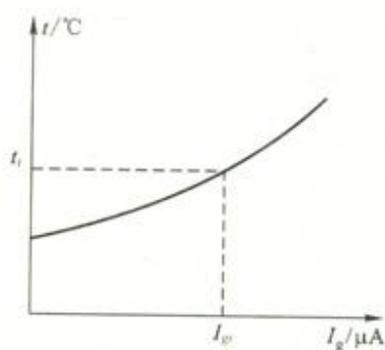


图 51-4 定标曲线

### (1) 通电

将感温元件置于被测温度场中,接通电源开关  $S_1$ ,指示灯亮,微安表指针应有一定偏转.为了防止微安表及热敏电阻过载,通电前应将电位器  $R$  按逆时针方向旋转一个角度,使  $U_{cd}$  较小.

### (2) 校准

将  $S_2$  扳向“校”,温度计处于“校准”状态,根据微安表指针偏转大小,仔细调节  $R$ ,使指针刚好指向满刻度值.

### (3) 测量

将  $S_2$  扳向“测”,使温度计处于测量状态,这时微安表便指示出温度值.

## 实验任务

1. 根据图 51-3,设计电路参数  $U_{cd}$ ,  $R_1$  ( $R_2$ ),  $R_3$  和  $R_4$ .
2. 把  $R_1$  ( $R_2$ ),  $R_3$  和  $R_4$  调到设计值,并且安装成一台热敏电阻温度计.
3. 用一只水银温度计(作为标准)对这台热敏电阻温度计进行校验(与后边互应),对其测量误差做出判断.

## 实验条件

1. 热敏电阻温度计实验安装板.如图 51-5 所示,板上安装一只微安表,五个电位器,十七个接线柱,还有按键开关  $S_1$ ,单刀双掷开关  $S_2$ ,发光二极管 LED,限流电阻  $R_i$  等.  $R_1$  ( $R_2$ ),  $R_3$ ,  $R_4$  本应是固定值电阻,现为了教学的需要,分别以电位器代替,实验者可以设法将它调到所需要的值.图 51-5 中的实线部分已经焊接好,虚线部分由实验者自己连接.

2. 一号干电池两节.根据  $U_{cd}$  的大小,只需一节干电池就可以了,为什么需要提供两节?

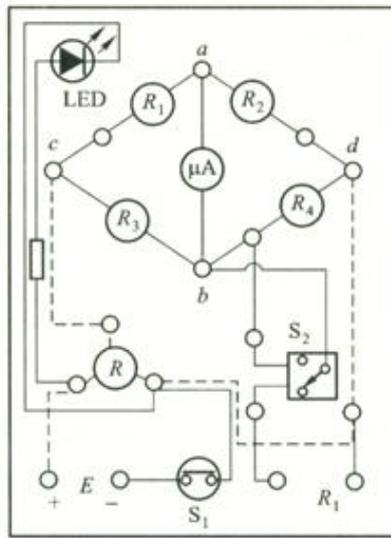


图 51-5 热敏电阻温度计配线图

3. 感温元件——负温度系数热敏电阻器一只,并附其温度特性曲线.
4. QJ23 直流电桥箱一台.
5. 标准电阻箱一台.
6. 万用表一台.
7. 两只等值电阻和一台指针式检流计.
8. 水银温度计和体温计各一只.

注:6、7 中提到的元件不是必须的,只是在调节  $R_1$  ( $R_2$ ) 时,有了更多的一些方法供选择.

### 方法提示

1. 按式(6)计算出  $R_1$  ( $R_2$ ) 并把它们分别调到设计值.

调节  $R_1$  ( $R_2$ ) 要保证比较高的准确度,可以采用如下方法之一种:

- (1) 使用电桥箱.
- (2) 在实验板上临时搭成一个直流电桥,利用两只等值电阻和一台标准电阻箱组成电桥的三个桥臂,第四个桥臂由  $R_1$  ( $R_2$ ) 来担任.
- (3) 万用表的欧姆挡加标准电阻箱,用替代法来测量和调节  $R_1$  ( $R_2$ ) 的值.

2. 调节  $R_3$ , 使  $R_3 = R_1$ .

$R_3$  和  $R_4$  的调节不需要其他设备的帮助,在  $R_1$  和  $R_2$  已调好的基础上,依靠实验板自身的电路功能,可以十分准确地完成  $R_3$  与  $R_4$  的调节. 比如调节  $R_3$  时,

将电路按图 51-3 接好,将感温元件撤下来,换上标准电阻箱  $R_0$ ,利用平衡电桥原理,很容易将  $R_3$  调节成任一需要的值。

3. 调节  $R_4$ ,使  $R_4 = R_{t_2}$ 。

图 51-3 中,用标准电阻箱  $R_0$  代替感温元件  $R_t$ ,首先将  $S_2$  扳向“测”,调节  $R_0 = R_{t_2}$ ,再调节  $R$  使微安表满偏。然后, $S_2$  扳向“校”,利用“替代法”的原则,将  $R_4$  调到与  $R_0$  值相等。

4. 定标实验。按表 1 数据描绘定标曲线。

表 1 定标实验数据表

$t/^\circ\text{C}$	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70
$R_t/\text{k}\Omega$											
$I_x/\mu\text{A}$											

表中第 2 行数据通过查阅特性曲线得到,表中第 3 行数据通过实验得到。用  $R_0$  代替感温元件, $R_t$  在各种温度下的阻值都可以通过调节  $R_0$  来实现。

5. 误差校验

(1) 用电阻温度计和水银温度计测同一温度场中的水温

水银温度计指示为  $t_0 = \underline{\hspace{2cm}}$   $^\circ\text{C}$ , 热敏电阻温度计指示为  $t = \underline{\hspace{2cm}}$   $^\circ\text{C}$ , 相对误差  $E = \frac{t - t_0}{t_0} \times 100\% = \underline{\hspace{2cm}}$ 。

(2) 用热敏电阻温度计和体温计同时测体温

体温计的指示为  $t_0 = \underline{\hspace{2cm}}$   $^\circ\text{C}$ , 热敏电阻温度计的指示为  $t = \underline{\hspace{2cm}}$   $^\circ\text{C}$ , 相对误差  $E = \frac{t - t_0}{t_0} \times 100\% = \underline{\hspace{2cm}}$ 。

试分析产生误差的可能原因有哪些。

### 创新园地

1. 有人说,图 51-3 电路中的状态选择开关  $K_2$  可以省掉, $R_4$  也可以省掉。这种说法是否有道理?为什么?

2. 请运用电桥平衡原理来设计一台测温装置——测温电桥。本实验装置中微安表改换成灵敏电流计,这时  $R_3$  应有怎样的功能?

3. 有资料显示,有四十余种物理效应随温度而变化,并且已经利用这些效应制成了温度计。请你去查阅相关资料,然后尽可能多地列举出这些物理效应的名称。

## 实验五十二 磁性液体表观密度的实验研究

372 第五章 研究性实验

### 实验五十二 磁性液体表观密度的实验研究

磁性液体(magnetic fluid)简称磁流体,它是由单分子层(2 nm)表面活性剂包覆的,直径小于10 nm的单畴磁性颗粒高度弥散于某种载液中而形成的“固液”两相胶体溶液,既具有液体的流动性,又具有固体磁性材料的磁性,是一种性能独特、应用广泛的新型纳米液态功能材料<sup>[1]</sup>,理想的磁流体磁滞回线是一条过坐标原点的S型曲线,无磁滞现象<sup>[2]</sup>.磁流体技术是一门涉及物理、化学、力学、流变学等多学科的交叉边缘学科,是材料科学中的一支新秀<sup>[3]</sup>.

在外界磁场作用下,磁流体具有悬浮、承压、密封、导航、定位等特性,我们利用磁流体密度受磁场梯度影响而分布的非均匀性,研制出“磁流体表观密度随磁场变化测量仪”<sup>[4]</sup>,既能测量磁流体中不同深度的表观密度,也能测量磁流体中某点的表观密度随磁场变化的规律.

#### 实验原理

##### 1. 磁流体的表观密度

用透明玻璃细管盛满磁流体并置于恒定非均匀磁场中,则管内单位体积磁流体受到重力 $F_g$ 和磁力 $F_m$ 的作用,若重力方向为 $Z$ ,则其所受合力为:

$$F_z = F_g + F_{mz} \quad (1)$$

若用 $H$ 表示磁场强度,用 $\chi_m$ 表示磁流体的磁化强度, $\frac{\partial H}{\partial Z}$ 表示 $Z$ 方向的磁场梯度, $\rho_m$ 表示磁流体固有密度,则式(1)为

$$F_z = \rho_m g + \chi_m H \frac{\partial H}{\partial Z} \quad (2)$$

若磁场梯度 $\frac{\partial H}{\partial Z} > 0$ ,则 $F_z > \rho_m g$ .相当于磁流体得到加重,或者说,磁流体的固有密度在非均匀磁场中发生了变化,在这种情况下磁流体的密度就称为表观密度或视密度,用 $\rho_s$ 表示:

$$\frac{F_z}{g} = \rho_m + \chi_m H \frac{\partial H}{\partial Z} / g$$

即:

$$\rho_s = \rho_m + \chi_m H \frac{\partial H}{\partial Z} / g \quad (3)$$

$\rho_s$ 即为磁场中磁流体的表观密度.可见,表观密度不仅与其固有密度有关,还与它的磁化强度、它所在环境中的磁场及磁场梯度有关.

##### 2. 测量原理

由式(3),只要测出 $\rho_m$ 、 $\chi_m$ 、 $H$ 以及 $\frac{\partial H}{\partial Z}$ 即可求出 $\rho_s$ 。但这种方法需要的仪器种类较多,程序也比较复杂。磁流体做为一种固液两相胶体溶液,它的表观密度可以用流体静力称衡法通过单盘天平来测量。测量程序与实验二中描述的方法大致相同。具体提示如下:

1) 在天平横梁的左端,用细线悬吊一个由非铁磁质制成的平衡锤,在天平的砝码盘上加砝码,测出平衡锤在空气中的质量 $m$ 。

2) 将平衡锤吊入密度为 $\rho_w$ 的蒸馏水中,测出平衡锤在蒸馏水中的表观质量 $m_w$ ,得到

$$mg - m_w g = \rho_w Vg \quad (4)$$

式中 $V$ 是平衡锤的体积, $\rho_w$ 是蒸馏水的密度。

3) 将平衡锤吊入盛有磁流体的玻璃量筒内,测出它在磁流体中的表观质量 $m_s$ ,得到

$$mg - m_s g = \rho_s Vg \quad (5)$$

由式(4)、(5)得

$$\rho_s = \frac{m - m_s}{m - m_w} \rho_w \quad (6)$$

可见,只要测出平衡锤的固有质量 $m$ ,以及它在蒸馏水中表观质量 $m_w$ 和在磁流体中的表观质量 $m_s$ ,则可求出磁流体的表观密度 $\rho_s$ 。

值得指出的是,测 $m_s$ 时,应在平衡锤所在处及周围的有限空间内提供一个非均匀磁场。这个磁场由电磁铁产生,电磁铁固定在天平的底座上,如图52-1所示。只要在电磁铁线圈中通以电流 $I$ ,即可产生磁场,且磁场强度 $H$ 随 $I$ 而变。在量筒内的不同深度, $m_s$ 将不同。即使在同一深度, $I$ 变化时, $m_s$ 也将发生变化。

### 实验任务

1. 测量磁流体在不同深度 $h$ 处的 $\rho_s$ ,至少测6个点,并作出 $\rho_s - h$ 曲线,根据曲线形状说明变化规律,解释产生这种变化的原因。

2. 在同一深度测 $\rho_s$ ,改变励磁电流,至少取6个 $I$ 值,并作出 $\rho_s - I$ 曲线。根据曲线形状说明变化规律,解释产生这种变化的原因。

3. 允许学生在上述两项任务之外,另寻其它实验课题,实验室将提供帮助。

### 实验条件

实验室提供磁流体表观密度测量仪、高斯计、磁流体样品等。

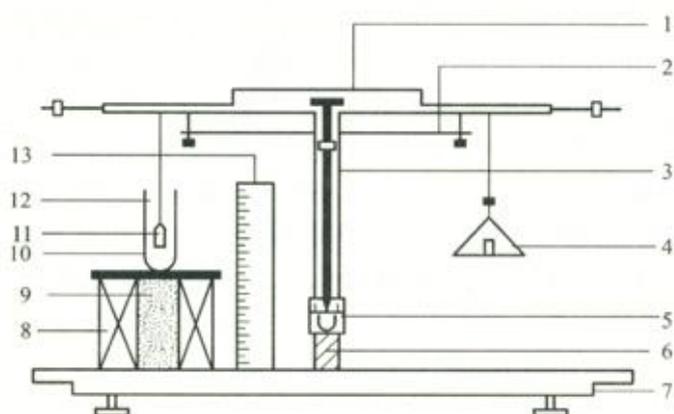


图 52-1 磁性液体表观密度测量仪结构示意图

1. 天平横梁 2. 横梁支架 3. 天平支柱 4. 天平称盘 5. T型螺母 6. T型螺杆 7. 天平底座  
8. 磁化线圈 9. 铁心; 10. 玻璃量筒 11. 平衡锤 12. 磁流体 13. 标尺

磁流体表观密度测量仪,如图 52-1 所示,它是由四部分组成;一是单盘天平,调节 T 形螺母 5 和 T 形螺杆 6,可以使横梁 1 上升或下降;二是由磁铁 8、9 及直流稳压电源(稳压电源未画出),调节稳压电源的输出电压,可以改变励磁电流  $I$ ;三是玻璃量筒 10,用来盛磁流体试样 12;四是深度标尺 13,用来测量平衡测锤所在的深度。

### 方法提示

1. 单盘天平的操作方法与双盘天平基本相同。
2. 励磁电流不大于 1.4 A。
3. 励磁线圈工作时,应将铁磁物质以及易受磁场影响的其他物品移开。

### 创新园地

利用磁流体在非均匀磁场中表观密度的变化规律,已经成功地用来分选密度不同的非铁磁性物质,这就是“比重法分离技术”。具体做法是:把两种需要分离的材料放入磁流体中,然后施加外磁场,使其中一种材料上浮,另一种材料下沉。日本研制的比重分选机成功的将混杂在一起的玻璃和陶瓷分离。

根据你的实验结果,请你预测一下你能将哪些材料从磁流体的底部悬浮上来?不妨试一试。

### 参 考 资 料

- 1 姬海宁,兰中文,王豪才. 纳米技术在磁性材料中的应用,磁性材料及器件. 2002. 33(2):25~28
- 2 徐教仁,刘思林,腾荣厚等. 高饱和磁化强度氮化铁磁性液体的研制,金属功能材料. 2001. 8(6):28~31
- 3 蒋秉植,杨健美. 磁性液体材料的应用.,化工新型材料. 1994. 4:1~5
- 4 李学慧,陆鸿钧,张萍. 磁流体表观密度随磁场变化测量仪,发明专利. 2003. 02132428. X

## 实验五十三 磁性液体密封容器泄放压的实验研究

纳米功能材料磁性液体除实验五十二所介绍的结构、特性、应用以外,其在密封方面也别具特色. 磁性液体属超顺磁材料,在没有外磁场情况下,各磁性微粒(10 nm左右)的磁矩是无规则分布的,当施加外磁场时,磁性微粒的磁矩几乎立即沿磁力线取向,因此可借助于外界磁场来定位和控制磁性液体,磁性液体密封就是根据这一性能发展起来的新兴技术.

### 实验原理

在静止部件与运动部件之间的间隙中建立起足够强磁场,将磁性液体吸聚在其间,形成类似O形环一样的液体环,依靠磁性液体本身的表面张力和磁力,阻止压力介质通过而起到密封作用. 磁性液体密封一般分为动态密封和静态密封两种,本实验属于静态密封.

### 实验条件

如图53-1所示,磁性液体密封装置由密封腔、密封盖、压力容器、压力表和高压气源等部分组成. 在密封腔的端面上注入少许磁性液体,并加上密封盖,此

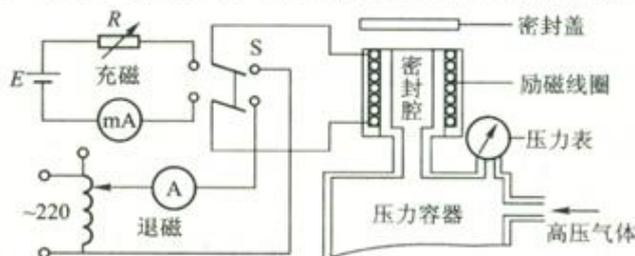


图 53-1 磁性液体密封装置示意图

### 参 考 资 料

- 1 姬海宁,兰中文,王豪才. 纳米技术在磁性材料中的应用,磁性材料及器件. 2002. 33(2):25~28
- 2 徐教仁,刘思林,腾荣厚等. 高饱和磁化强度氮化铁磁性液体的研制,金属功能材料. 2001. 8(6):28~31
- 3 蒋秉植,杨健美. 磁性液体材料的应用.,化工新型材料. 1994. 4:1~5
- 4 李学慧,陆鸿钧,张萍. 磁流体表面密度随磁场变化测量仪,发明专利. 2003. 02132428. X

## 实验五十三 磁性液体密封容器泄放压的实验研究

纳米功能材料磁性液体除实验五十二所介绍的结构、特性、应用以外,其在密封方面也别具特色. 磁性液体属超顺磁材料,在没有外磁场情况下,各磁性微粒(10 nm左右)的磁矩是无规则分布的,当施加外磁场时,磁性微粒的磁矩几乎立即沿磁力线取向,因此可借助于外界磁场来定位和控制磁性液体,磁性液体密封就是根据这一性能发展起来的新兴技术.

### 实验原理

在静止部件与运动部件之间的间隙中建立起足够强磁场,将磁性液体吸聚在其间,形成类似O形环一样的液体环,依靠磁性液体本身的表面张力和磁力,阻止压力介质通过而起到密封作用. 磁性液体密封一般分为动态密封和静态密封两种,本实验属于静态密封.

### 实验条件

如图53-1所示,磁性液体密封装置由密封腔、密封盖、压力容器、压力表和高压气源等部分组成. 在密封腔的端面上注入少许磁性液体,并加上密封盖,此

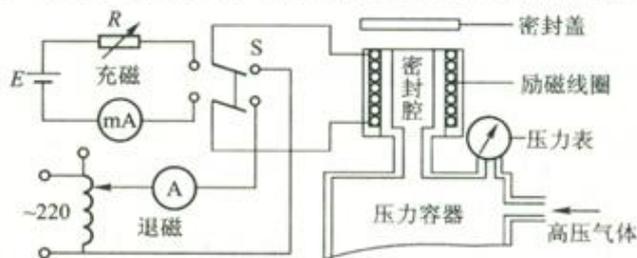


图 53-1 磁性液体密封装置示意图

## 实验五十八 黑箱实验

究之中,随着集成光学技术的进一步发展,光纤通信将进入全光通信时代,即进入第三代光纤通信时代。

### 创新园地

1. 请考虑为什么观察二进制光脉冲“0”码状态与“1”码状态的光强时,要用手动编码键调制发射光源?

2. 若用示波器可观察到发射端的数字电信号波形,而观察不到接收端整形后的数字电信号波形,请针对这种现象进行故障判断。

1) 判断发生故障的部位(光发射机、光信道、光接收机的哪一部分,可参考图 57-2),并说明分析根据;

2) 至少判断两种故障。

3. 若使用图 57-11 中所示的继电器常开、常闭组合触点控制直流电机正、反转时,考虑电机、电源如何接线?并说明该电路与图 57-8 所提示电路比较有哪些优点。

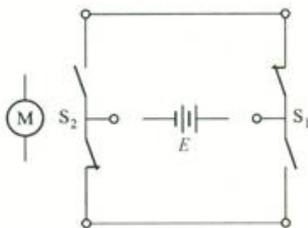


图 57-11 电机正、反转控制提示电路

### 参考资料

- 1 王延恒. 光纤通信技术基础. 天津:天津大学出版社,1996. 7 1~8
- 2 数字光纤通信系统. 中国科普博览\_电信博物馆网页.  
<http://www.kepu.com.cn/gb/technology/telecom/fiber/fbr600.html>

## 实验五十八 黑箱实验

黑箱(black box),是指那些内部结构和性能无法直接观测,只能通过外部观测和试验去认识其性能和特性的系统或客体.研究黑箱有两种方法,一种是开启黑箱法,即将黑箱分成局部,研究其内部结构和功能.物理学家在研究物质的层次和结构时,就是不断开启黑箱的过程.但由于开启黑箱时,可能引起黑箱本身结构和功能的变化,而且有些黑箱是不允许打开或者由于技术问题尚不能打开,所以这种方法有很大局限性.另一种方法是不开启黑箱,即不破坏黑箱本身的结构,而是有目的地对黑箱输入信息,观察黑箱对应的输出信息,并利用分析、综合、类比等逻辑的方法和必要的数学运算而得出结论。

本实验要求学生用不开启黑箱的方法进行研究.通过这种研究方法的学习,对激发学生的学习兴趣、调动学生的学习积极性、培养学生的独立工作能力和创

造能力,都具有显著的积极作用.

### 实验原理

#### 1. 电阻、热敏电阻

##### 1) 电阻

一般在电路中所用的电阻,是指专门设计制造的电阻器,简称电阻.普通电阻的阻值与温度的关系接近线性,若 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时电阻值为 $R_0$ ,温度为 $t$ 时的电阻值近似有如下公式: $R_t = R_0(1 + \alpha t)$ , $\alpha$ 称为电阻的温度系数.多数电阻的 $\alpha$ 在 $10^{-4} \sim 10^{-3}\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ 数量级,由于这一温度系数较低,随着电流在电阻中的流动,电阻的阻值基本保持不变,而电阻两端的电压降与通过电阻的电流遵循欧姆定律.

##### 2) 热敏电阻

热敏电阻是由某些金属(如锰、镁、钴、镍、铁等)的氧化物按不同的比例混合,并经过高温烧结后制成的.它的阻值随温度的改变而迅速变化.其阻值随温度升高而减小者,称为负温度系数热敏电阻;阻值随温度升高而增加者,称为正温度系数热敏电阻.

热敏电阻的温度特性曲线如图 58-1 所示.其中,曲线 1 表示负温度系数热敏电阻,曲线 2 表示正温度系数热敏电阻,一般热敏电阻的温度系数在 $10^{-2} \sim 10^{-1}\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ 数量级.

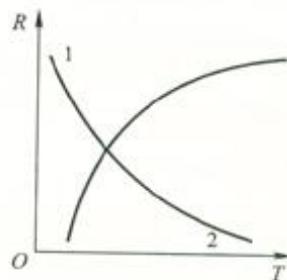


图 58-1 温度特性

#### 2. 电容器、电感器

##### 1) 电容器

电容器的基本功能是可以被充电和放电,也就是储存电能和释放电能.在充电期间,电容器上的电荷和电压按指数增长,电路中有一指数衰减的充电电流;充电完毕,电流消失,电容上电压达到稳定值而不再变化(见图 58-2).

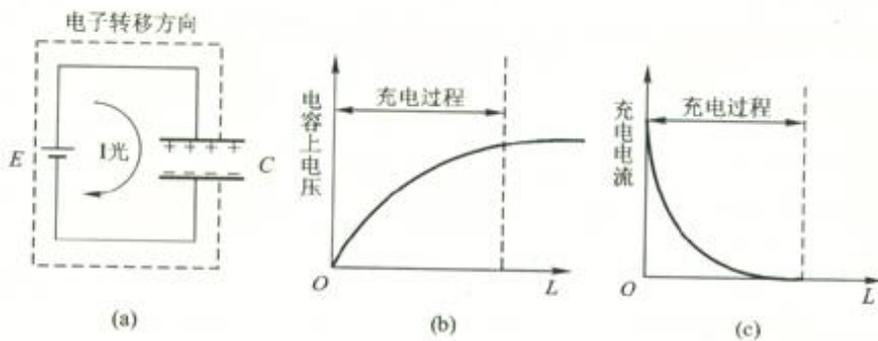


图 58-2 充电过程

如果把电容器接在直流电路中,只有当电源开启时的充电和关闭时的放电这两个暂时的过程中,电路上存在电流.所以,就稳态而言,直流电流不能通过电容器,相当于开路.如果把电容器接在交流或脉动直流电路中,由于不停地充电放电,便使电路中始终有电流.可见,交变电流能够通过电容器,并且具有类似电阻那样的阻碍电流的作用.

### 2) 电感器

电感器的基本功能也是贮存能量和泄放能量.

基于电感器的基本功能,在直流电路中只存在电源开启和关闭这两个暂时的不稳定过程.上述过程消失之后,电感器对于直流电源相当于短路,不起阻碍电流的作用.然而,当其接于交流电源或脉动直流电源时,由于线圈周围的磁场不断变化,因而始终存在自感电势,有类似于电阻那样的阻碍电流的作用.

### 3. 半导体二极管

二极管具有单向导电特性,即正向导通,反向不导通,正、负两个方向的电阻不同.在实际电路中,就是应用它的这种单向导电特性,例如用它来完成检波和整流工作.

## 实验任务

1. 确定黑箱内每对接线柱之间所连接元件的名称,说明确定的依据.
2. 确定各元件数值,写出计算公式,说明测量方法和实验条件.

## 实验条件

实验室提供黑箱(箱子正面有八对接线柱,箱内每对接线柱之间只连有一个元件,也可能没有,也可能短路.元件可能是电池、电阻、正温度系数热敏电阻、负温度系数热敏电阻、电容、电感、半导体二极管、交流电源),此外还提供信号发生器、万用表、电流表、电压表、电阻箱、开关、导线等.

## 方法提示

1. 首先确定有无电池、交流电源及其具体位置.
2. 判断有无二极管.
3. 确定有无电容.
4. 说明每对接线柱间的测量结果(可列表说明),分析、确定判别方法,得出元件名称.
5. 确定元件数值.

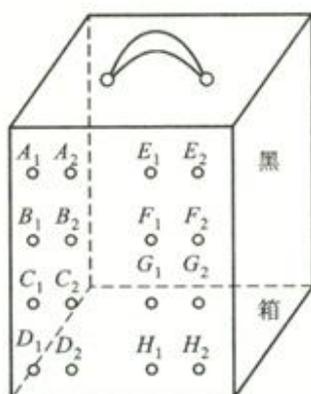


图 58-3 黑箱装置

创新园地

1. 在黑箱内  $A_1$ 、 $A_2$  接线柱间连有电阻,  $B_1$ 、 $B_2$  间连有电感, 有一电容可连接在  $A_1$ 、 $A_2$ 、 $B_1$ 、 $B_2$  四个接线柱的任何两个接线柱之间, 共有如下四种可能, 如图 58-4 所示. 如何确定电容器的具体位置?

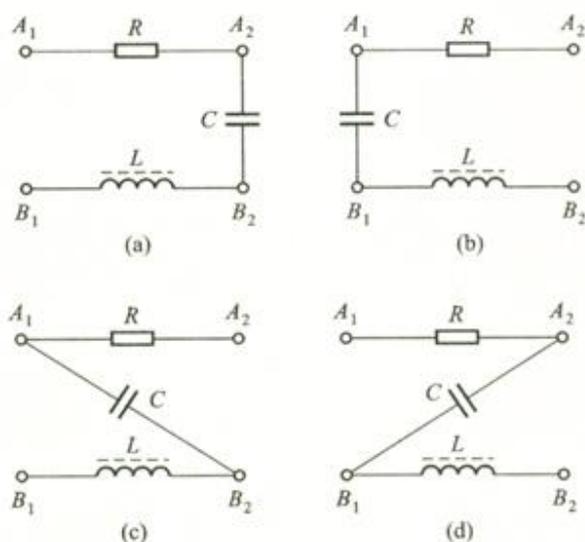


图 58-4 电阻、电感、电容的四种连接

2. 若将黑箱内某两对接线柱间的电阻、电容、电感如图 58-5 所示连接, 如何用万用表和信号发生器两种仪器测出电容、电感的数值  $C$ 、 $L$ .

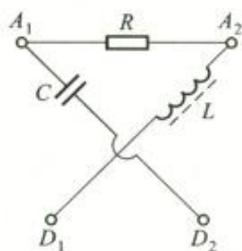


图 58-5 三元件的某种连接

### 参 考 资 料

- 1 田金柱. 物理实验研究与设计. 大连:大连出版社,1998
- 2 贝之. 无线电元器件原理及选用. 北京:北京出版社,1983