

## 第 1 章

## 设计性实验

## 1.1 设计性实验概论

设计性实验是近几年来出现的新的实验类型,它的形式、内容和教学方法至今还在不断地充实、发展和完善中。

物理实验范围内所遇到的实验方法,大多是前人创造和总结出来的科学方法。我们学习这些方法,一方面是学习它、掌握它、运用它,但更主要的是积累前人正确的思维方法,从中吸取规律性的认识,并在未来的工作中去创造和开拓。这就是进行设计性实验的主要目的。

上册介绍了各种物理量的测量方法、误差概念和数据处理的方法,并安排了一定数量的基本实验,对仪器的使用、设备的调整做了训练,使学生具备了观察实验现象,独立操作测量和分析仪器故障的初步能力。但相对来说,在基本实验中所用的仪器设备,一般均由实验室准备妥当,实验的要求和内容也由教师或教材明确规定。这是学生获取知识和积累经验的初级阶段,是必不可少的。

在完成一定数量的基本实验的基础上,安排若干设计性实验是完全可能的,也是十分必要的。设计性实验是由教师或教材提出课题的总的基本要求,这些要求通常是带有综合应用性质和具有设计任务的,学生可以在这一总要求下,自行推证有关原理,确定实验方法,选用和配套仪器,拟订实验程序,调整仪器设备,正确操作,合理处理实验数据等。最后还要写出一份比较完整的实验报告,并列出为完成本实验所查找的主要参考资料目录。

在完成设计实验过程中,应努力掌握有关的理论、知识和技能,不但要创造性地去完成自己拟订的实验内容和任务,而且要注意努力培养自学和查阅文献、书刊、手册的能力,为撰写科技论文做初步的训练。通过实验活动,丰富自己的知识技能,提高理论联系实际的水平,最大限度地培养和造就独立进行科学实验的本领。

## 1.2 实验方案的选择原则

要设计一个实验,首先要选择实验方案。实验方案的选择一般来说应包括:实验方法和测量方法的选择;测量仪器和测量条件的选择;进行综合分析与误差计算,选择能达到设计要求的最佳方案。

### 1.2.1 实验方法的选择

根据研究对象,罗列各种可能的实验方法,分析各种方法的适用条件,比较各种方法的局限性与可能达到的实验精确度等因素,并考虑方案的可行性,最后选择最佳的实验方案。

例如:

[实验要求]:欲测量如图 1-02-1 所示的圆柱体的密度,要求测量结果的相对不确定度小于 0.5%。

[给定仪器]:量筒,物理天平(0.02 g),分析天平(0.1 mg),卡尺(0.1, 0.05, 0.02 mm 3 种),螺旋测微计(千分尺, 0.01 mm)。

[测量原理]:

测量固体的密度可用公式

$$\rho = \frac{m}{V}$$

只要测出物体的质量  $m$  和体积  $V$  就可算得密度  $\rho$ 。

[分析]:

对于体积  $V$  的测量最简单的有 3 种方法,即

- ①量筒法;
- ②阿基米德法;
- ③用测长仪器测量。

例如,被测物体的质量  $m \approx 35$  g, 体积  $V \approx 4$  cm<sup>3</sup>, 直径  $D \approx 1$  cm, 高度  $h \approx 5$  cm, 经过粗略分析可知

$$E_{\rho} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_m}{m}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_V}{V}\right)^2}$$

因为实验要求的测量精度为 0.5%, 根据不确定度“等量分配”原则, 应有  $\frac{\sigma_m}{m} \leq 0.0035$ ;

$$\frac{\sigma_V}{V} \leq 0.0035。$$

若用量筒法测量,  $\sigma_V = V \times 0.0035 = 0.014$  cm<sup>3</sup>。显然, 没有哪一种量筒可以达到这样高的测量精度。

若用阿基米德法测量,  $V$  等于排开同体积的水的重量, 现排开水的体积为 4 cm<sup>3</sup>, 排开水的质量是 4 g。这样, 测量体积变成了测量质量。

但物理天平的精度是 0.02 g, 故也不能用阿基米德法来测量。

若用长度测量工具测量

$$E_{\rho} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_m}{m}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_h}{h}\right)^2 + \left(2\frac{\sigma_D}{D}\right)^2}$$

当要求  $E_{\rho} \leq 0.5\%$  时, 就必须要求  $\frac{\sigma_m}{m} \leq 0.0029$ ;  $\frac{\sigma_h}{h} \leq 0.0029$ ;  $2\frac{\sigma_D}{D} \leq 0.0029$ , 即  $\frac{\sigma_D}{D} \leq 0.0015$ 。将被测物体的数据代入, 得

$$\sigma_m = m \times 0.0029 = 0.11 \text{ g (可用精度为 0.02 g 的物理天平)}$$

$$\sigma_h = h \times 0.0029 = 0.015 \text{ cm (可用精度为 0.05 mm 的卡尺)}$$

$$\sigma_D = \frac{D \times 0.0029}{2} = 0.0015 \text{ cm (可用精度为 0.01 mm 的千分尺)}$$

由此可见, 应选择精度分别为 0.02 g 的物理天平、0.05 mm 的卡尺和 0.01 mm 的外径千分尺来测量就可达到实验所要求的相对不确定度, 但在测量直径时, 应尽量多测几次, 以减小测量不确定度。

### 1.2.2 测量方法的选择

在选定实验方法之后, 还应该选择恰当的测量方法。有的物理量用确定的工具测量时只能有一种方法, 但有的物理量的测量却可以有几种测量方法, 这时应该对测量不确定度作初步的分析, 务求使测量结果的不确定度最小。

例如: 用米尺测定如图 1-02-2 中二圆心的间距  $L$ , 应该选择哪种测量方法所产生的不确定度最小?

显然, 可以有下列 4 种测量方法:

①直接测量  $L_1$ 。因两圆心很难确定, 一般不用此法;

$$\textcircled{2} L_2 = l_1 + \frac{d}{2} + \frac{D}{2};$$

$$\textcircled{3} L_3 = l_2 - \frac{d}{2} - \frac{D}{2};$$

$$\textcircled{4} L_4 = (l_1 + l_2)/2。$$

用米尺测量时, 每次测量的最大不确定度为 0.5 mm, 由误差分析可知, 测量  $L$  的不确定度分别为

$$\sigma_{L_2} = \sqrt{(\sigma_{l_1})^2 + \left(\frac{\sigma_d}{2}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_D}{2}\right)^2} = 0.6 \text{ mm};$$

$$\sigma_{L_3} = \sqrt{(\sigma_{l_2})^2 + \left(\frac{\sigma_d}{2}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_D}{2}\right)^2} = 0.6 \text{ mm};$$

$$\sigma_{L_4} = \sqrt{\frac{1}{4}(\sigma_{l_1}^2 + \sigma_{l_2}^2)} = 0.4 \text{ mm}$$

可见, 第 4 种测量方法具有最小的不确定度。也就是说最佳的测量方法应该是第 4 种测量

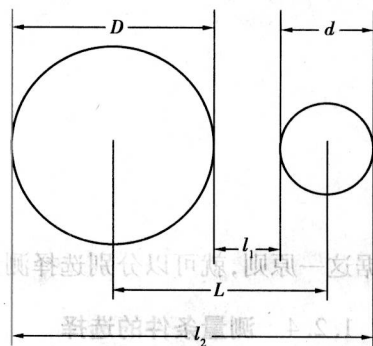


图 1-02-2

方法,在这种方法中,不必对直径进行测量,只要测出两圆外切的长度  $l_2$  和内切的长度  $l_1$  即可。

### 1.2.3 测量仪器的选择

测量仪器的选择原则是选用合适的仪器以达到指定的测量精度,并不是说测量仪器的精度越高越好。如果不适当地选择了精度太高的仪器,会给测量带来不必要的麻烦。其原因:一是仪器精度越高,使用前的调整工作越费时间;二是仪器精度越高,其成本越贵,若使用不当会越容易损坏。像在前面所说的测量圆柱体质量的例子中,如果用万分之一的分析天平来测量肯定能达到实验所需要的精度,但经过分析计算后,发现只要用精度为  $0.02\text{ g}$  的物理天平来测量圆柱体的质量已足够了,不必用精度再高的其他天平。

另外,在选择仪器时,要求所有测量仪器要配套。所谓配套,就是指在一个实验中所有物理量的测量的相对不确定度应该“等量分配”,不应该产生其中一个物理量测量的相对不确定度特别小,而另一个物理量测量的相对不确定度又特别大的情况,如果碰到这种情况,就是仪器选择不配套。正确的选择原则应该使一个实验中对所有物理量的测量项的相对不确定度应该相等。

例如,在测量圆柱体密度时,若要求测量的相对不确定度小于  $0.5\%$ , 根据公式  $E_\rho = \frac{\sigma_\rho}{\rho} =$

$\sqrt{\left(\frac{\sigma_m}{m}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_h}{h}\right)^2 + \left(2\frac{\sigma_D}{D}\right)^2}$ , 则要求测量中 3 个物理量的相对不确定度分别为



$$\frac{\sigma_m}{m} \leq 0.003$$

$$\frac{\sigma_h}{h} \leq 0.003$$

$$\frac{\sigma_D}{D} \leq 0.002$$

根据这一原则,就可以分别选择测量质量  $m$ 、高度  $h$  和直径  $D$  的测量工具了。

### 1.2.4 测量条件的选择

在具体测量时还应该选择最有利的测量条件。什么是最有利的测量条件呢?就是在因函数关系引起的不确定度最小的条件下进行测量。这个条件可以由求函数的相对不确定度的极值得到。对单元函数,只需取一阶和二阶导数,并使一阶导数等于零,解出相应的变量之值,再将此值代入二阶导数,若二阶导数大于零,则所求之值即为函数不确定度最小的测量条件。

例如:求出惠斯登电桥测量的最有利条件。

惠斯登电桥的电路原理图如图 1-02-3 所示。

电桥平衡的条件是

$$\frac{R_x}{R_s} = \frac{l_1}{l_2}$$

若标准电阻  $R_s$  精度足够高时,测量误差主要由长度的不确定度来决定,即

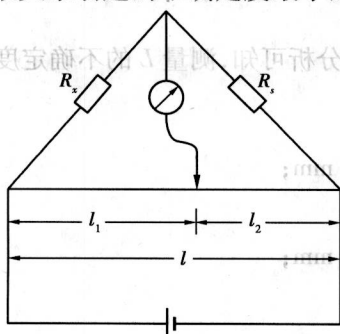


图 1-02-3



$$E = \frac{\sigma_{R_x}}{R_x} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_{l_1}}{l_1}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{l_2}}{l_2}\right)^2} = \frac{\sqrt{l^2 - 2ll_1 + 2l_1^2}}{l_1(l - l_1)} \sigma_{l_1}$$

式中假定  $\sigma_{l_1} = \sigma_{l_2}$ 。

由  $\frac{dE}{dl_1} = 0$  得

$$\frac{(2l_1 - l)(l^2 - l_1l + l^2)}{(l_1l - l_1^2)^2 \sqrt{2l_1^2 - 2l_1l + l^2}} = 0$$

解得

$$l_1 = \frac{l}{2}$$

当  $l_1 = \frac{l}{2}$  时

$$\frac{d^2E}{dl_1^2} > 0$$

所以,  $l_1 = \frac{l}{2}$  是板式惠斯登电桥最有利的测量条件。

### 1.3 设计性实验举例

#### 1.3.1 设计题目

用伏安法测电阻  $R_x$  的阻值。

#### 1.3.2 要求

$\frac{\Delta R_x}{R_x} \leq 1.5\%$ , 自己选择仪器和确定测量条件。

#### 1.3.3 可供选择的电表规格

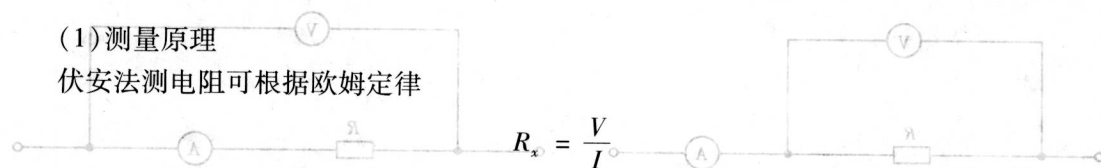
伏特计:  $0 \sim 1.5 \sim 7.5 \text{ V}$ , 表头电流  $1 \text{ mA}$ ;

毫安计:  $0 \sim 25 \sim 50 \sim 100 \text{ mA}$ , 表头压降  $26 \sim 30 \text{ mV}$ 。

#### 1.3.4 设计

##### (1) 测量原理

伏安法测电阻可根据欧姆定律



测出  $I$  和  $V$  即可算出  $R_x$ 。

##### (2) 仪器和测量条件的选择

### ①仪器等级的确定

由欧姆定律  $R_x = \frac{V}{I}$  推得,  $\frac{\sigma_{R_x}}{R_x} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_I}{I}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_V}{V}\right)^2}$ , 根据合理选择仪器的不确定度“等量分配”原则, 为了保证  $\frac{\sigma_{R_x}}{R_x} \leq 1.5\%$ , 要求  $\frac{\sigma_V}{V} \leq 1.1\%$ ,  $\frac{\sigma_I}{I} \leq 1.1\%$ 。

由电表的等级不确定度的规定知道:  $\frac{\sigma_V}{V_m} \leq f\%$ ,  $\frac{\sigma_I}{I_m} \leq f\%$  (其中  $f$  为电表的级数,  $V_m$  和  $I_m$  分别为相应电表的量程), 显然, 无论是电压表或者电流表, 在这里都选用 0.5 级的电表。

### ②电压表和电流表量程的确定

现在若用甲电池 (1.5 V) 供电, 根据所提供伏特表量程 0 ~ 1.5 ~ 7.5 V, 则电压表应选 0 ~ 1.5 V, 因而  $\sigma_V \leq 0.5\% \times 1.5 \text{ V} = 0.0075 \text{ V}$ , 为了达到  $\frac{\sigma_V}{V} \leq 0.75\%$ , 测量时必须使伏特计的读数满足的条件为

$$V \geq \frac{\sigma_V}{1.1\%} = 0.68 \text{ V}$$

为了选定电流表的量程和确定测量条件, 使  $\frac{\sigma_I}{I} \leq 1.1\%$ , 可粗测  $R_x$  的数值 (例如用万用表测量), 或根据待测  $R_x$  所标阻值粗定  $R_x$  的数值。例如, 本实验待测的电阻  $R_x \approx 30 \Omega$ , 这样可由欧姆定律估算出

$$I_{\max} = \frac{V}{R_x} = 50 \text{ mA}$$

故应选用 0.5 级, 量程为 0 ~ 50 mA 的电流表。这样,  $\sigma_I = 0.5\% \times 50 \text{ mA} = 0.25 \text{ mA}$ 。

为了达到  $\frac{\sigma_I}{I} \leq 1.1\%$ , 测量时必须使

$$I \geq \frac{\sigma_I}{0.75\%} = 23 \text{ mA}$$

故得到的测量条件是

$$0.68 \text{ V} \leq V \leq 1.5 \text{ V}$$

$$23 \text{ mA} \leq I \leq 50 \text{ mA}$$

### (3)设计线路图

伏安法测电阻只可能有如图 1-03-1 和图 1-03-2 的两种接线方法。因被测电阻大约为 30  $\Omega$ , 用这两种线路来测量都可以, 但由于两种仪表的相互影响, 无论用哪种方法进行测量, 都将引起系统误差。对于外接法, 应对电流  $I$  进行修正; 对于内接法应对电压  $V$  进行修正。

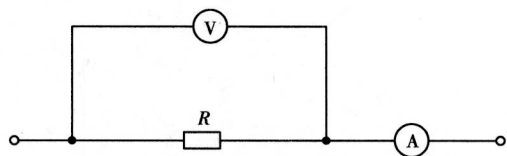


图 1-03-1 外接法

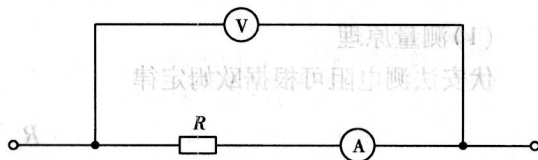


图 1-03-2 内接法

由于所选用的是0.5级电压表和电流表,下面先估算电表在两种测量中所产生的影响。对于伏特计,因表头电流为1 mA,则对1.5 V量程的内阻为

$$R_V = \frac{1.5 \Omega}{10^{-3}} = 1500 \Omega$$

因被测电阻  $R_x \approx 30 \Omega$ ,故以外接法测量时,对测量结果的影响为  $\frac{R_x}{R_V} = \frac{30}{1500} = 2.0\%$ 。

对于0.5级50 mA的电流表,表头的电压降取其中间值28 mV时,电流表的内阻为

$$R_A = \frac{V}{I} \approx 0.56 \Omega$$

故用内接法测量时对测量结果带来的影响为  $\frac{R_A}{R_x} \approx \frac{0.56}{30} = 1.9\%$ 。可见,对本实验所选用的仪器来说,两种接线方法所产生的系统误差都很大,必须进行修正才能满足实验所提出的  $\frac{\sigma_{R_x}}{R_x} \leq 1.5\%$  的要求。

①当用外接法时,应对电流进行修正,此时计算得的待测值

$$R_x = \frac{V}{I - I_V} = \frac{V}{I - \frac{V}{R_V}}$$

②当用内接法时,则应对电压进行修正,此时计算得的待测值

$$R_x = \frac{V - V_A}{I} = \frac{V - R_A \cdot I}{I}$$

由于电流表的量程是50 mA,而要求的测量电流是在34~50 mA,因此在线路连接时还要采用分压电路进行控制。

#### (4) 测量及计算

①测量时要注意操作规程,尤其要注意不能超过电流表的量程。

②要用多次测量,以减少随机误差。

③用均方根误差进行计算,并对测量结果进行讨论。

以上是一个简单的含测量精度要求的物理实验设计题目的示例,请学生们认真领会其过程、步骤及要考虑的问题,以此作为参考。在有的设计题目中,还要先对几种实验方案进行比较,选择最好的实验方案与实验方法。选择实验方案不仅与被测物理量和它所要求的测量精度有关,还与实验设备有关,且牵涉面较广,前面已有例子说明,这里就不再举例了。

## 实验1 误差分配和实验仪器的选择

在工程技术和实验技术领域,经常会遇到这样的情况:例如,对某一项目进行检测,可供选用的仪器、仪表和量具的品种很多。但是它们运用的科学原理不同,采用了方式各异的检测机构 and 显示形式,以及有着不同的测试精度,而且成本和价格也相差甚大。在这种情况下,就要求实验者能按照检测任务的需要和实际的可能,进行统筹考虑,对使用的仪器、仪表和量具做出合理的选择。一般地说,选择仪器时可以从以下几个方面来考虑:①规格(量程),②精确

度(误差大小),③灵敏度(分辨率),④实用性和价格。其中最后两项,在学生训练阶段可暂不考虑,但在实际工作中,却是非考虑不可的。

### 一、实验目的

①学习和训练在实际测试过程中,如何根据误差要求和误差分配原则,对实验仪器做出合理的选择。

②学习和训练如何根据误差分析结果选定简单测量电路,确定电表的量程、规格以及电源输出电压。

### 二、实验要求

①合理选择测量圆柱体(直径  $D \approx 25 \text{ mm}$ , 高  $H \approx 55 \text{ mm}$ ) 体积的量具。分别要求满足: (a)  $E_V \leq 0.2\%$ , (b)  $E_V \leq 1.0\%$ , (c)  $E_V \leq 5.0\%$ 。说明选择的依据,并得出各实验结果。

②用多量程电流表、电压表和具有多挡输出的直流稳压电源,测出几个电阻元件的阻值 ( $R_x$  约为  $5 \Omega$ 、 $50 \Omega$  和  $500 \Omega$ , 额定功率均为  $1/4 \text{ W}$ ), 并进行误差分析。

a. 确定测量方法,画出完整的测试电路。

b. 根据仪器引入的最大相对不确定度  $\frac{\sigma_{R_{\text{仪}}}}{R} \leq 1.5\%$  的要求,对电表的等级、量程、稳压电源输出电压和测量条件做出合理的选择。

c. 对测量方法引入的系统误差进行修正,确定实验结果所达到的精度。

### 三、实验提示

①实验误差的分配和仪器的选择,参阅 1.2 节。

②用多量程电流表、电压表测量电阻时,应根据待测电阻的大小来选定电流表内接或外接的测量方法,同时导出表头内阻引入的系统误差修正公式,并对结果进行修正。为使具体实验时能灵活使用这两种接法,可设计用一个开关,使两者合并成一个电路,通过开关转换实现任意选择。

③根据待测电阻之额定功率,算出最大允许电流  $I_{\text{max}}$  或能承受的最高电压。为了不使电阻发热,一般选用  $\frac{1}{5} I_{\text{max}}$  作为测试工作电流。然后确定稳压电源输出的大小和检测电表的量程规格与测量条件。

### 四、参考资料

[1] 肖明耀. 误差理论与应用[M]. 北京: 计量出版社, 1985.

[2] 张兆奎, 等. 大学物理实验[M]. 上海: 华东理工大学出版社, 1990.

## 实验 2 重力加速度的研究

### 一、实验目的

①测定本地重力加速度。

## ②研究测定重力加速度的几种方法。

## 二、实验要求

①测定本地重力加速度  $g$  值,要有 4 位有效数字。测定值与公认值比较,百分误差要小于 1%。

②从单摆和自由落体两方面来研究测定重力加速度的方法。

## 三、实验提示

重力加速度  $g$  值是一个重要的地球物理常数。对它的准确测定,在理论上、生产上和科研上都有很大的意义。从实验方法与技能的要求来看,也能使我们得到很多教益。

测定重力加速度的方法很多,较简单的有单摆法,也可用开特摆(可逆摆)测定,复杂些的自由落体测定等,它们各有其特点。

用以上方法测定重力加速度主要是测量长度和时间。测量长度的工具有米尺、镜尺、投影仪、经纬仪等,测量时间的工具有电子秒表、毫秒计、频率计等。要根据实验要求来选用这些仪器。

## (1) 单摆

摆长为  $l$  的单摆,其摆动周期  $T$  与摆角  $\theta$  的关系为

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}} \left( 1 + \frac{1}{4} \sin^2 \frac{\theta}{2} + \dots \right)$$

取零级近似时,有

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

要注意用此公式的条件。

在实验中要研究  $T$  和  $l$ 、 $\theta$ 、 $m$ (小球质量)的关系。

实验时, $l$  应如何测量? 单摆摆动次数应以不少于几次为好? 为什么?

## (2) 开特摆

开特摆是一种特殊形式的复摆(物理摆)。它可以颠倒悬挂,正、倒两次测得的周期各为  $T_1$  和  $T_2$ :

$$T_1 = 2\pi \sqrt{\frac{J_c + mh_1^2}{mh_1g}}$$

$$T_2 = 2\pi \sqrt{\frac{J_c + mh_2^2}{mh_2g}}$$

把上面两式合并,消去  $J_c$  和  $m$ ,得

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

式中  $h_1, h_2$ ——重心到两次悬挂支点的距离。

为了提高测定  $g$  值的精确度,应该使  $h_1$  与  $h_2$  的差值尽量大。

在实验中可研究开特摆和单摆的不同和联系,并注意哪些量可测准确,哪些量不易测准,



怎样使其误差尽量减小。

(3)用自由落体测定  $g$  值(光电计时法)

在自由落体支架上有两个光电门  $A$  和  $B$ , 小铁球落下时, 经过  $AB$  的时间为  $t$ :

$$s = v_A t + \frac{1}{2} g t^2$$

试问:

能否用公式  $s = \frac{1}{2} g t^2$  来测量  $g$ ? 为什么? 若用以上公式,  $v_A$  如何测得和消除? 光电门应

怎样选择恰当的位置才能使实验结果有 4 位有效数字?

注意:

要使上、下两个光电门的中心在一条铅垂线上, 并使下落的小球中心经过两个光电门的中心。

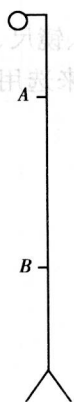


图 1-2-1

(4)用自由落体测定  $g$  值(频闪照相法)

采用频闪光源间断曝光, 同时用底片记录自由下落小球在间隔相等时间的各个位置的物像, 再用有关公式求出  $g$  值。

用频闪照相法测量长度时, 可把底片放在投影仪中进行(为什么?)。处理数据时可用逐差法。

#### 四、参考资料

[1] 林抒, 龚镇雄. 普通物理实验[M]. 北京: 人民教育出版社, 1981.

[2] 华中科技大学, 天津大学, 上海交通大学. 物理实验: 基础部分工科用[M]. 北京: 高等教育出版社, 1981.

[3] [美] 比切. 物理学导论: 上册[M]. 殷大均, 译. 北京: 人民教育出版社, 1980.

[4] [美] C. 基特耳, 等. 力学——伯克利物理学教程: 第 1 卷[M]. 北京: 科学出版社, 1979.

[5] [德] 威廉·H. 威斯特发尔. 物理实验[M]. 王福山, 译. 上海: 上海科学技术出版社, 1981.

## 实验 3 简谐振动研究

自然界中存在各种振动现象, 最基本最简单的振动是简谐振动。一切复杂的振动都可以分解为若干个简谐振动, 即可把复杂的振动看作若干个简谐振动的合成。简谐振动在研究电磁场振荡、固体的晶格振动以及分子振动等问题中是一种十分有用的模型。因此, 研究简谐振动是研究其他复杂振动的基础。本实验将对弹簧振子简谐振动的规律进行观察和研究。

### 一、实验目的

①学习进行简单设计性实验的基本方法, 培养简单实验的设计能力。

②学习如何选择实验方法来验证物理规律。

③通过简谐振动,研究弹簧振子中弹簧的有效质量,测定弹簧的倔强系数。

## 二、实验要求

(1)设计一个验证简谐振动运动规律的方案

①写出应验证的规律与验证方法。

②写出数据处理方法。

③写出提出所需要的仪器设备与器材。

(2)设计测量弹簧有效质量和倔强系数的实验方法

①写出测量方法。

②数据处理方法。

③拟出测量步骤。

④列出数据处理表格。

## 三、实验提示

可供选择参考的有气垫导轨法与焦利秤法。

(1)气垫导轨法

如图 1-3-1 所示弹簧振子系统,质量为  $M$  的物体与  $AB$  面之间光滑无摩擦,两弹簧的倔强系数分别为  $k_1$  和  $k_2$ ,物体两边各与弹簧的一端相连,使物体  $M$  振动后,试证明:

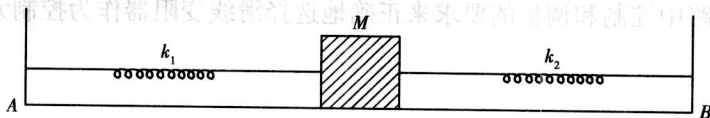


图 1-3-1

①这一系统作简谐振动。

②系统振动的周期  $T = 2\pi \sqrt{\frac{M + m_e}{k_1 + k_2}}$ 。其中  $m_e$  为弹簧在振动体振动时的有效质量。由此考虑如何验证简谐振动的运动规律,以及如何测定  $m_e$  和系统的  $k(k = k_1 + k_2)$  值。

(2)焦利秤法

使焦利秤的一根弹簧作上下振动,它的周期

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{M + m_e}{k}}$$

## 四、分析讨论题

①测量周期  $T$  时,取多少个周期为宜? 这是由什么因素决定的?

②用气垫导轨法做谐振动实验时,滑块的振幅在振动过程中不断减少,是什么原因? 对实验结果有无影响?

③用气垫导轨法做谐振动实验时,导轨由水平放置改为倾斜放置(可在导轨一端的下面垫一个垫块),对实验的结果有无影响? 根据观察的结果从理论上加以证明。

④从理论上讨论可得,弹簧的有效质量为  $m_e = \frac{m}{3}$ ,  $m$  为弹簧质量,试与实验所测得的结果进行比较分析。

## 五、参考资料

- [1] 林杼,龚镇雄. 普通物理实验[M]. 北京:人民教育出版社,1987.
- [2] 程守洙,江之永. 普通物理学:第三册[M]. 3版. 北京:人民教育出版社,1979.
- [3] [美]A. M. 波蒂斯, H. D. 杨. 大学物理实验[M]. 北京:科学出版社,1982.

## 实验4 变阻器在电路中的使用和研究

变阻器在电路中的应用十分广泛,许多电路中都利用变阻器来满足控制要求。一般来说,控制电路中的电压或电流都可以用滑线变阻器来达到。但是,变阻器必须根据控制要求来选择,如果选择不当,就不能达到调节要求。例如,在做过的“伏安法测电阻”实验里,经常会发现电表指针所指方位不明确,很难控制指针定位,电表读数未能达到一个精确程度,从而导致实验数据误差增大。主要原因在于:控制电路中的滑线变阻器与负载电阻不相匹配以及细调程度不够精确。

为此,要正确地设计控制电路,就必须对滑线变阻器在电路中的不同接法的特点有全面的了解,才能根据电路中控制和调整的要求来正确地选择滑线变阻器作为控制元件。

### 一、实验目的

- ①研究滑线式可变电阻的有关参数。
- ②根据电路中控制和调整的要求,正确选择滑线式可变电阻器。

### 二、实验要求

- ①滑线式可变电阻的两种接法(分压和限流)在性能上的比较:
  - A. 调节范围和细调程度的分析(与哪些物理量有关?)。
  - B. 画出“分压特性曲线”及“限流特性曲线”,学会两种不同接法的用途。
- ②上述两种接法的可变电阻,分别用不同阻值(一般可相差10倍)串联或并联或混联,在讨论其调节特性基础上进行比较、分析。
- ③应用上面讨论的结论,考虑设计一种满足下述特性的控制电路:
  - a. 设计一个能满足一定精度要求,求阻值为  $100\ \Omega$  的未知电阻的控制电路(所用仪表由实验室给定)。
  - b. 设计一个校正伏特表的控制电路。

### 三、实验提示

①所谓电路的调节范围是指电路参数(电流、电压、电阻等)的调节范围。如对一定控制电路而言,调节范围就是指研究的负载两端的电压(或电流)的变化范围如何受控制元件变化

的影响。电压(或电流)由最小值到最大值的范围就是我们讨论的调节范围。

②所谓细调程度是指当控制元件(一般直流电路中指可变电阻中电阻值)每改变最小的可能变化(电阻器最小挡的一挡电阻或滑线电阻中一圈的电阻值)时,负载上所反映出来的电流或电压的改变量的大小。

③电路控制的线性程度是指当控制元件作线性变化时,负载上所反映出来的电流或电压的变化是否也是呈线性。电路控制的线性程度是否取决于电路参数的特性曲线的线性程度。

④分压器的分压特性曲线和限流器的限流特性曲线就是指负载上的电压  $V$  或电流  $I$  与变阻器上滑动触头位置的曲线。其线性程度与  $K = \frac{R_L}{R_0}$  值有关( $R_L$  为负载电阻,  $R_0$  为滑线式可变电阻的最大阻值,  $K$  称为电路特征系数)。若电阻器上活动触点的某一位置把  $R_0$  分为  $R_1$  和  $R_2$  (即  $R_0 = R_1 + R_2$ , 而  $x = \frac{R_1}{R_0}$ ), 可以取不同  $K$  值(如  $K = 10, 1, \frac{1}{10}$  等), 求出对应的  $V \sim x$  曲线(或  $I \sim x$  曲线), 从而进行分析。

⑤在考虑设计和连接控制电路时, 对所用电源、电阻或者负载的各项参数(电动势、内阻、电阻值、最大容许输出功率或最大承受电流等)都应逐一分析、设计, 并记录所得之结论。

#### 四、参考资料

从研究控制电路的角度来看, 一个实验的电路一般可分为电源(给出一定的电压)、控制电路、测量电路3部分, 测量电路是先根据实验的要求确定好的。例如要校准某一安培计, 先要选好标准安培计, 使它和待校安培计串联, 这就是测量电路。测量电路既已确定, 总是可以把它抽象地用一个电阻  $R$  来代表, 称为负载。根据负载所要求的电压值  $V$  和电流值  $I$  ( $V = IR$ ), 就可以选定电源, 一般的电学实验对电源并不苛求, 实际上只要选电源电压  $E$  大于  $V$ , 电源的额定电流大于  $I$  的都行, 只不过如果电源电压选得太高的话, 电能会有较大的浪费。

负载和电源都确定后, 就可以安排控制电路, 使负载能获得所需的电压值(或电压范围), 控制电路有制流和分压两种最基本的接法。为了设计好控制电路, 先分析这两种接法的性能和特点:

##### (1) 制流电路(图 1-4-1)

①调节范围: 当  $C$  移至  $A$  端时, 负载上的电压  $V$  最大, 相应的电流也最大

$$\text{最大电压} \quad V_M = E$$

$$\text{最大电流} \quad I_M = \frac{E}{R}$$

(1-4-1)

当  $C$  移至  $B$  端时, 变阻器全部串入回路, 负载上的电压最小, 令  $R_0$  表示变阻器的全电阻, 则

$$\text{最小电压} \quad V_m = \frac{R}{R + R_0} E$$

$$\text{相应地} \quad I_m = \frac{E}{R + R_0} \quad (1-4-2)$$

式(1-4-1)及式(1-4-2)表明, 制流电路的电压调节范围是  $\frac{R}{R + R_0} E \rightarrow E$ , 相应地电流的调节范围

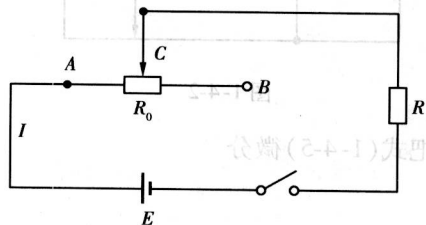


图 1-4-1

是  $\frac{E}{R+R_0} \rightarrow \frac{E}{R}$ , 调节范围跟变阻器的阻值有关,  $R_0$  越大则  $V_m$  越小, 调节范围越大。

②细调程度: 从做过的电学实验知道: 即使电压值在控制电路的调节范围内, 有时会很难调到准确的指定值。虽然用心调节变阻器, 但负载上的电压不是比指定值稍微偏大, 就是比指定值稍微偏小, 这种现象反映了控制电路细调程度的不足, 那么, 细调程度跟哪些因素有关呢?

负载上的电压改变是靠推动变阻器的活动接头实现的。实际上, 即使很细心地推动活动接头, 它的位移总有一定的数值(不会是数学上的无穷小), 对线绕变阻器来说, 位移至少是绕丝的一个圈, 若绕丝的一圈电阻值为  $\Delta R_0$ , 那么控制电路阻值变化至少是  $\Delta R_0$ , 负载上电压的最小改变量  $(\Delta V)_m$  必然也受限制。

因 
$$V = \frac{R}{R_{AC} + R} E$$

微分得 
$$\Delta V = \frac{RE}{(R_{AC} + R)^2} \Delta R_{AC}$$

故 
$$\left. \begin{aligned} (\Delta V)_m &= \frac{V^2}{E \cdot R} \Delta R_0 \\ \text{相应的回路电流 } I \text{ 的最小改变量 } (\Delta I)_m &= \frac{I^2}{E} \Delta R_0 \end{aligned} \right\} \quad (1-4-3)$$

式(1-4-3)表明, 当电路的所有元件确定后( $E, R, \Delta R_0$  都一定), 负载上的电压越小,  $(\Delta V)_m$  越小, 控制电路能够较精细地改变负载的电压, 但随着  $V$  的增加,  $(\Delta V)_m$  成平方地增加, 细调的能力迅速下降。

## (2)分压电路(图 1-4-2)

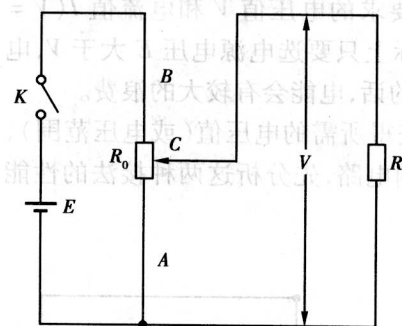


图 1-4-2

### ①调节范围

活动接头  $C$  从  $A$  移到  $B$ ,  $V$  就为零变到  $E$ , 调节范围和变阻器阻值无关。

### ②细调程度

因 
$$V = \frac{R_{AC} R}{R_{BC} R_{AC} + R R_0} E \quad (1-4-4)$$

可以分 3 种情况考虑:

第一种:  $R \gg R_0$  时,

$$V \approx \frac{R_{AC}}{R_0} E \quad (1-4-5)$$

把式(1-4-5)微分

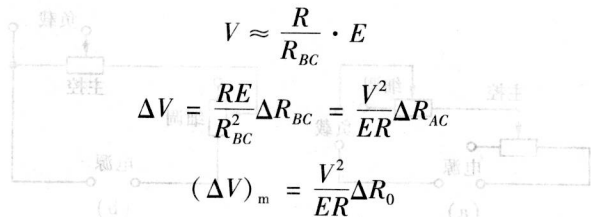
$$\Delta V = \frac{E}{R_0} \Delta R_{AC}$$

故  $V$  的最小改变量

$$(\Delta V)_m = \frac{E}{R_0} \Delta R_0 \quad (1-4-6)$$

当  $E, R_0, \Delta R_0$  都是一定的数值时,  $(\Delta V)_m$  也是定值, 亦即元件选定后, 在整个调节范围的精细程度处处一样。

第二种:  $R \ll R_0$ , 由式(1-4-2)得



$$V \approx \frac{R}{R_{BC}} \cdot E$$

$$\Delta V = \frac{RE}{R_{BC}^2} \Delta R_{BC} = \frac{V^2}{ER} \Delta R_{AC}$$

$$(\Delta V)_m = \frac{V^2}{ER} \Delta R_0 \quad (1-4-7)$$

比较式(1-4-3)和式(1-4-7),两者完全一样,即当  $R \ll R_0$  时,分压接法和制流接法的细调程度一样。

第三种: $R$  和  $R_0$  有相同的数量级,这时计算公式比较复杂,但计算结果表明,只要  $R \geq 2R_0$ ,其结果和  $R \gg R_0$  相差不远,粗略可以归入  $R \gg R_0$  这一类;而当  $R < \frac{1}{10}R_0$  时,粗略可看作是  $R \ll R_0$ ,即基本上和制流一样;当  $2R_0 > R > \frac{1}{10}R_0$ ,属于前两者之间的过渡。

总之,分压电路仅  $R > 2R_0$  时和制流电路有显著的区别,此时两种电路的性能差异比较如下:

a. 从调节范围看,分压电路可从  $0 \rightarrow E$ ,而制流电路只能从  $\frac{R}{R+R_0}E \rightarrow E$ ,调节范围较分压小些。

b. 从细调程度看,分压电路在整个调节范围内基本上是均匀的,而制流电路则是不均匀的,负载上的电压  $V$  小时能调节得较精细,而  $V$  大时则很粗略。

c. 从控制电路本身消耗的功率看,由于分压电路比制流电路多接通了一条支路( $BC$  支路),如果使用同一个变阻器,分压消耗的电能总要比制流大些,这部分被浪费的电能当然是越小越好,因此在功率较大的场合常采用制流,这样做比较节省。

### (3) 怎样安排控制电路

一般在安排控制电路时,并不要求设计出一个最佳方案,只要根据现有设备,设计出能满足实验要求、安全而省电的电路就可以了,设计的方法一般不必做复杂的计算,可以边实验边改进,具体建议如下:

①根据负载的阻值  $R$ 、要求调节的范围先确定电源电压  $E$ ,然后综合比较一下采用分压还是制流。

②若采用制流,根据式(1-4-2)算出  $R_0$ 。若采用分压,根据  $R \gg R_0$ ,兼顾省电的原则,适当选择  $R_0$ 。

③根据以往实验的经验估计一下细调程度是否足够,也可以先连接电路做实验,看看在整个调节范围内细调是否满足要求。如果细调不能满足要求,可以加接变阻器做细调,细调的线路很多,如图 1-4-3 所示。

### (4) 设计举例

**例 1** 试为测量某元件的伏安特性设计控制电路。已知元件的阻值  $R < 50 \Omega$ ,要求测量范围为  $0.01 \text{ A}$  到  $0.1 \text{ A}$ 。

**解** 负载要求的电压为  $0.1 \times 50 \text{ V} = 5 \text{ V}$ ,故采用电压为  $60 \text{ V}$ 、额定电流  $> 0.1 \text{ A}$  的电源,实际上,用 1 号干电池组或实验室一般的稳压电源都可以。

考虑到负载电阻  $R$  较小,若采用分压, $R_0$  值更小,浪费的电能较大,不如采用制流, $I_m =$



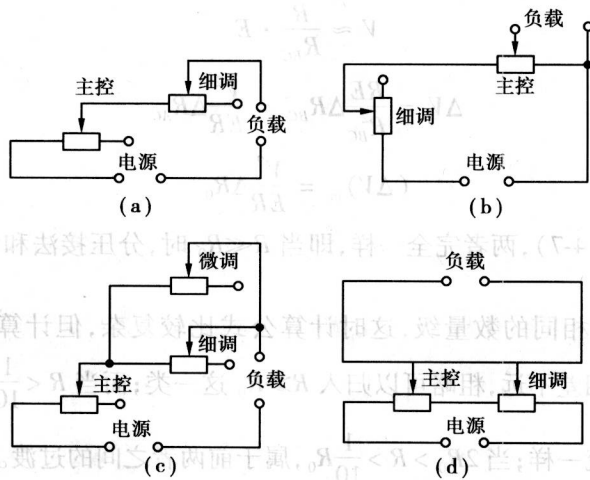


图 1-4-3

0.01 A,  $E = 6\text{ V}$ ,  $R = 50\ \Omega$ 。

根据式(1-4-2)算得  $R_0 \approx 600\ \Omega$ , 故挑选的变阻器应略大于  $600\ \Omega$ , 这样的变阻器额定电流都大于  $0.1\text{ A}$ , 安全不成问题。

接电路做实验, 可能发觉细调程度不够, 于是加接细调, 电路见图 1-4-4。

**例 2** 为校准伏特计安排控制电路, 已知负载电阻(待校表与标准表内阻的并联)  $R = 1\ 500\ \Omega$ , 伏特计量程为  $15\text{ V}$ , 等分  $100$  格。

**解** 负载要求电压最高  $15\text{ V}$ , 电流很小, 选用  $18\text{ V}$  的稳压电源或电压大于  $15\text{ V}$  的干电池组都行。

由于负载电阻和调节范围都比较大, 宜采用分压电路, 根据  $R_0 \leq \frac{1}{2}R$ , 选用  $600\ \Omega$  的变阻器, 这种变阻器的额定电流为零点几安培, 计算得实际通过的电流约为  $0.03\text{ A}$ , 肯定安全。

由于表面有  $100$  个分格, 要求调准到  $1$  格的  $\frac{1}{10}$ , 从实验的经验可知, 要使变阻器活动接头位移为全长的千分之一是很勉强的, 加一级细调则方便得多, 最后的电路设计见图 1-4-5。

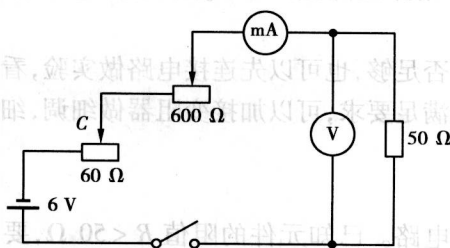


图 1-4-4

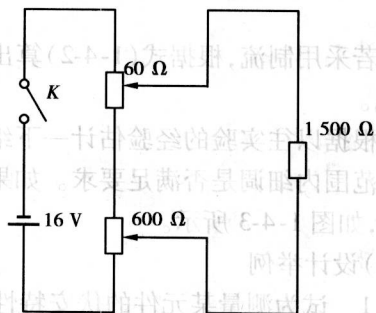


图 1-4-5

## 实验5 电位差计校准电表和测定电阻

电位差计是最常用的电工仪器之一,其工作原理是基于补偿法。在测量时由于补偿回路中电流为零,即不从被测电路中取得电流,故不改变被测电路的工作状态(当然不是绝对的,检流计灵敏度越高,越接近于零)。电位差计不仅可以用来测定电源的电动势,而且还可以作为校准电流表或电压表的标准仪器,或对电阻作精确测定,若配上热电偶,则可进行温度的测量。

### 一、实验目的

- ①训练简单测量电路的设计和测量条件的选择。
- ②加深对补偿法测量原理的理解和运用。

### 二、实验要求

可根据具体情况,选做两项或全做。

#### (1) 校准量限为 3 V 的电压表

- ①令稳压电源在 0~3 V 间作连续可调输出,设计标准电压表的控制电路。
- ②根据电位差计和待校表的量限,选取适当的分压比和分压器总电阻。
- ③作  $\Delta U \sim U$  校准曲线( $\Delta U$  为校准值与电压表示值之差),对待校表做出质量评价。

#### (2) 校准量限为 3 mA 的电流表

- ①令稳压电源作 3 V 固定输出,设计校准电流表的控制电路。
- ②要求控制电路的电流调节范围为 0.5~3 mA,选取适当的取样电阻和变阻器阻值。
- ③作  $\Delta I \sim I$  校准曲线( $\Delta I$  为标准值与电流表示值之差),对待校表精度做出评价。

#### (3) 测定电阻值

- ①令稳压电源固定输出为 1.5 V。设计测定待测电阻的控制电路。若所用电位差计只有一组输入测量端,则应设计一个电路能对标准电阻和待测电阻的端电压作连续测量的控制电路。

- ②选择合适的测量条件:标准电阻值、控制电路的工作电流和变阻器阻值。

- ③测量次数不少于 6 次,估算其标准误差。

### 三、实验提示

#### (1) 分压器和分压比

不同型号的电位差计,测量范围各不相同,量程上限也有几十毫伏至几十伏的多种规格。若配上分压器,则可使测量范围扩大。

如图 1-5-1 所示的分压器, A、B 为电压输入端,其总阻值为  $R_0$ , A、C 为输出端,移动滑动头 C 可控制输出电压的大小。

当 C 在某一位置时,若令其分电阻为

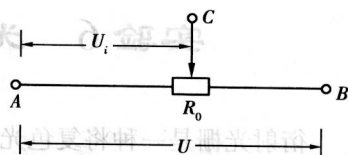


图 1-5-1