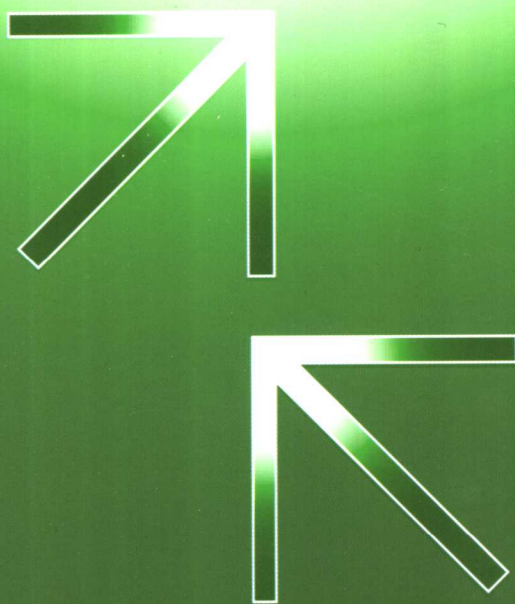


赵维义 主编  
Zhao Weiyi

# 大学物理 实验教程



>>>>>> Textbook of College Physics Experiment

清华大学出版社

# 大学物理实验教程

赵维义 主编  
Zhao Weiyi

清华大学出版社  
北京

## 内 容 简 介

本教材的主要内容包括实验基础理论和 34 个物理实验。

实验基础理论中给出了一些在实验数据处理中必须要用到的计算公式(如求测量与实验结果的不确定度),同时专门介绍了有关随机误差概念的统计理论,为任课教师和有兴趣的学生提供参考资料。

实验中安排了实验目的、仪器用具、实验原理、实验内容、数据处理等实验相关内容,并在每个实验的后面安排了思考题,以提高学生对实验的掌握程度。同时为了区分物理原理(理论或概念)与实验原理,在某些实验中,将与实验技术、实验方法、实验仪器设备无直接联系的物理定律、定理等物理概念单独列为相关物理概念进行讲解,突出有关物理知识。在实验原理中则着重讲解与实验技术、方法及设备相关的实验设计思想和实现方案,突出实验技能方面的知识。

本教材符合国家教委制定的《高等学校物理实验教学基本要求》,根据大学一年级学生所掌握的物理概念与实验基础知识编写而成,可以作为大学物理实验教材使用。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13501256678 13801310933

## 图书在版编目(CIP)数据

大学物理实验教程/赵维义主编. —北京:清华大学出版社,2007.11

ISBN 978-7-302-15656-7

I. 大… II. 赵… 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(2007)第 103389 号

责任编辑:朱红莲

责任校对:焦丽丽

责任印制:李红英

出版发行:清华大学出版社

<http://www.tup.com.cn>

[c-service@tup.tsinghua.edu.cn](mailto:c-service@tup.tsinghua.edu.cn)

社总机:010-62770175

投稿咨询:010-62772015

地址:北京清华大学学研大厦 A 座

邮编:100084

邮购热线:010-62786544

客户服务:010-62776969

印刷者:北京市清华园胶印厂

装订者:三河市新茂装订有限公司

经销:全国新华书店

开本:185×260 印张:17.75

字数:406 千字

版次:2007 年 11 月第 1 版

印次:2007 年 11 月第 1 次印刷

印数:1~3000

定价:29.00 元

本书如存在文字不清、漏印、缺页、倒页、脱页等印装质量问题,请与清华大学出版社出版部联系调换。联系电话:010-62770177 转 3103 产品编号:021380-01

# 前言

物理实验是一门独立的基础课程,本教材是在符合国家教委制定的《高等学校物理实验教学基本要求》的前提下,考虑一年级学生的物理概念与实验基础知识进行编写的。

实验基础理论对进行实验工作具有重要的指导作用,是学生能否积极主动而且较顺利地完实验学习的关键。本教材将一些带有共性的理论内容进行整合,组成较为统一的实验基础知识篇。实验基础理论涉及到较多的概率论知识,这对于一年级的大学生来说难度较大,本教材一方面从应用角度出发,经过简单的概述后,给出一些在实验数据处理中必须要用到的计算公式(如求测量与实验结果的不确定度),同时专门用一节的篇幅系统介绍有关随机误差概念的统计理论,为任课教师和有兴趣的学生提供参考资料。

本书共包含 34 个实验,实验项目的编排仍按通行的三层次结构,即分为基本技能训练实验;综合应用能力训练实验,提高、近代与设计性实验三部分。在每一部分中,实验项目编排次序尽量与物理理论教学体系保持一致。在第一层次中尽量选那些物理概念在高中阶段大都已经学过的实验项目,使学生在理解实验的物理原理上不至于感到困难,可以将主要精力集中在基本实验技能训练、主要实验方法学习和对实验基础理论知识的掌握和运用上。在一些相关实验中还给出了有关的数据记录表格和不确定度计算公式,使学生尽快掌握实验规则和基础理论,养成良好的科学实验习惯,同时也为在第二、三层次实验训练中大胆放手强化能力训练奠定了基础。

参加编写的人员为赵维义、卫道坦、张琳、容敏丽、林树渊、朱小飞、吴庆丰。另外彭玉平负责全书绝大部分附图的绘制和部分附图的修改工作。

本教材的编写实为一次尝试,难免有许多错误与不妥之处,恳请读者提出宝贵意见与建议。

作者

2007 年 6 月

# 目 录

|                      |     |
|----------------------|-----|
| 绪论                   | 1   |
| I 实验基础知识             | 4   |
| 1 物理实验基本仪器与主要测量方法    | 4   |
| 1.1 物理实验基本仪器         | 4   |
| 1.2 物理实验主要测量方法       | 25  |
| 2 实验基础理论             | 32  |
| 2.1 测量与不确定度          | 32  |
| 2.2 常用实验数据处理方法       | 45  |
| 2.3 随机误差的统计分析        | 52  |
| II 基本技能训练实验          | 57  |
| 实验 1 用单摆测量重力加速度      | 57  |
| 实验 2 用扭摆法测量刚体的转动惯量   | 60  |
| 实验 3 用三线摆测量刚体的转动惯量   | 67  |
| 实验 4 用拉伸法测定金属的杨氏模量   | 73  |
| 实验 5 用光杠杆测定金属的线膨胀系数  | 80  |
| 实验 6 用落球法测量液体的粘滞系数   | 84  |
| 实验 7 示波器的使用          | 88  |
| 实验 8 直流电路基本实验        | 100 |
| 实验 9 用补偿法测量电源的电动势    | 103 |
| 实验 10 平衡直流电桥及其应用     | 109 |
| 实验 11 薄透镜焦距的测定       | 114 |
| 实验 12 分光计的调节与使用      | 118 |
| 实验 13 等厚干涉——牛顿环、劈尖干涉 | 127 |
| III 综合技能训练实验         | 134 |
| 实验 14 动态法测金属材料的杨氏模量  | 134 |
| 实验 15 声速的测量          | 139 |

|             |                               |            |
|-------------|-------------------------------|------------|
| 实验 16       | 非平衡直流电桥及应用 .....              | 145        |
| 实验 17       | $RC$ 串联电路的暂态过程 .....          | 149        |
| 实验 18       | 用电子积分器测量通电螺线管轴向磁场及其分布 .....   | 153        |
| 实验 19       | 用示波器测铁磁质的磁化曲线和磁滞回线 .....      | 160        |
| 实验 20       | 霍耳效应研究 .....                  | 166        |
| 实验 21       | 利用霍耳效应测通电螺线管的轴向磁场 .....       | 173        |
| 实验 22       | 平行光管的调节和应用 .....              | 179        |
| 实验 23       | 用双棱镜干涉测光波波长 .....             | 185        |
| 实验 24       | 衍射光栅特性与光波波长测量 .....           | 188        |
| 实验 25       | 迈克耳孙干涉仪的调整与应用 .....           | 194        |
| 实验 26       | 光的偏振现象 .....                  | 201        |
| <b>IV</b>   | <b>提高、近代与设计性实验 .....</b>      | <b>210</b> |
| 实验 27       | 光电效应与普朗克常数测定 .....            | 210        |
| 实验 28       | 激光全息照相 .....                  | 216        |
| 实验 29       | 用电子积分器研究铁磁质的磁化特性 .....        | 224        |
| 实验 30       | 用纵向磁聚焦法测定电子的荷质比 .....         | 229        |
| 实验 31       | 光拍法测量光的速度 .....               | 234        |
| 实验 32       | 椭圆偏振法测量薄膜厚度、折射率和金属的复折射率 ..... | 243        |
| 实验 33       | 夫兰克-赫兹实验 .....                | 252        |
| 实验 34       | 电子电荷的测定 .....                 | 258        |
| <b>附录 A</b> | <b>基本常数表 .....</b>            | <b>263</b> |
| <b>附录 B</b> | <b>国际单位制简介 .....</b>          | <b>265</b> |
| <b>附录 C</b> | <b>常用物理量数据表 .....</b>         | <b>267</b> |

# 绪论

## 1. 物理实验的性质和目的

物理实验是科学实验的一个分支,物理实验的任务主要集中在测量物理量的量值及其在一定条件下的变化规律、研究与建立物质的运动规律两个方面。

大学物理实验课的主要目的是训练学生的科学实验能力与提高学生的科学实验素质,以便使学生具备独立进行科学实践活动的基础知识与基本技能;通过实验过程学习一些尚未学到的物理知识并加深对已学到的物理知识的理解;同时了解一些最新的科学发展前沿。科学实验能力可以归纳为如下几个方面:自学能力(从而能不断获取新的知识)、动手能力、分析解决问题的能力、安装调试仪器的能力、排除故障的能力、文字表达能力、归纳综合能力、设计创新能力、科学想像能力等。科学实验素质包括:理论联系实际和实事求是的科学作风,严谨踏实、认真细致的工作态度,遵守纪律、爱护公物的良好品格,善于思考,主动探究的钻研精神等。能力与素质二者同时兼备,才能在科学研究中取得重大成功。

## 2. 物理实验的地位和作用

大学物理实验是高等教育中的一门独立基础课程,是一门必修课。

物理学是一切自然科学的基础,物理学是一门实验科学,物理实验在物理学理论体系的建立和发展中一直起着十分重要的作用。而物理实验课的作用远不止于物理学本身,物理实验中既有对诸多物理规律的深入认识,又有对认识事物规律的各种方法、手段与技术的全面、系统的学习。物理实验在锻炼能力、培养素质方面是任何其他实践教学活动中所不可取代的。

物理实验是大学阶段开出的第一门实验课,因而成为此后所有实验课的先行课,各种有关实验活动的基础理论、基本规则、基本技能等都要在此课程中学习掌握和接受训练。

## 3. 物理实验的特点

### 1) 科学性

理论是科学,实验同样是科学,这可以从以下几方面来理解。首先,要求实验工作者必须充分尊重事实,来不得半点虚假,否则,必然出现谬误;其次,对实验数据的处理,是完全按照科学方法进行的,尤其是对随机现象的处理,则是以成熟而系统的概率统计理论为准的,因而是科学的而不是随意的。

### 2) 实践性

实验是实践活动。实践活动与理论工作不同,理论工作可以而且往往都对问题加以抽象化、理想化,忽略一些暂时认为不重要的因素。而做实验的时候,情况则恰恰相反,必须充分考虑到各种实际情况,得出的结论要尽量符合实际;符合做实验的环境的实际;符合做实验所用仪器、设备的性能、精度的实际;符合实验的物理条件(如物体大小,有无摩

擦等)的实际等。对实验结果进行评判、分析,必须结合实际情况,全面考虑,才能得出较正确的结论。

物理实验是以动手为主,手、脑并用的科学实践活动,必须进行实际的操作,只说不练是不行的。模拟实验、仿真实验、演示实验都只能对实验课学习起到辅助作用,决不能取代实际操作训练,否则必然会造成“一看就懂,一做就错”的结局。

### 3) 综合性

一个物理实验涉及到的知识领域往往是很宽广的,即使一个简单的力学实验,也常常涉及到电学、光学、热学、机械学等方面的知识。实验工作是借助于仪器来进行的,要做好实验,单单搞懂实验的物理原理是不够的,还要知道仪器怎么工作,怎么让仪器正常工作,即要搞清楚仪器的基本结构及其工作原理,这往往又会涉及到机械学、电子学,甚至自动控制等方面的知识。所以,一个优秀的实验工作者,他的知识面必须很宽广,不仅在某一学科领域有较深的造诣,而且在其他学科领域也要有一定的修养,并且会综合利用多学科的知识。

## 4. 物理实验的教学环节

任何一个实验项目都包括课前预习、课堂操作和课后处理三个环节。

### 1) 课前预习

在到课堂动手做实验之前,先要认真仔细地阅读教材或实验指导书,在对教材内容有了初步了解之后,在实验报告纸上的开始部分写出“预习报告”。预习报告的内容包括实验名称、实验目的、实验原理简述、操作步骤及应注意的问题。预习报告要用“心”去写,即要在理解的基础上用自己的构思去写。特别是原理部分,切忌大篇幅抄书,应该用自己的语言,简明扼要、高度概括地讲明,其中应包括用到的物理理论依据,实验仪器的工作原理,有关测量的计算公式,相应实验技术中的电路图、光路图以及记录实验数据的表格。课前预习是对自学能力的极好锻炼。课前预习的好坏是实验中能否取得主动,甚至是实验成功与否的关键。

### 2) 课堂操作

课堂操作是动手能力,手与脑并用的训练过程。在正式进行之前,首先要熟悉一下将要使用的仪器、设备、量具等的性能以及正确的操作规程,切忌盲目操作;其次要全面地想一想实验操作程序,修正自己预习的操作步骤,尽量做到更加合理。

实验中,要注意对现象的观察,尤其是对所谓的“反常”现象更要仔细观察分析,不要单纯地追求“顺利”。要养成对观察到的现象和测得的数据随时进行判断的习惯,判断正在进行的实验过程是否正常合理。在观察、测量时,还要做到正确读数,而且要实事求是地记录客观现象和数据。如果能做到及时判断处理反常现象和排除实验过程中出现的故障就更难能可贵了。

做完实验,要将实验数据交给教师检查,得到认可后,再将仪器归整复原好,方可离开教室。

### 3) 课后处理

在课下要对课上所测的实验数据进行处理并对观察到的实验现象进行分析。这与理论课的课下作业是完全不同的事,它本身就是实验的一个重要组成部分。

课后处理工作包括将课上测得的数据和观察到的现象工整地整理到实验报告纸上,位置可接在预习部分之后;对数据进行计算、处理,或按公式求出结果,或按函数关系在坐标纸上作图,然后按误差理论求出结果的可靠程度——不确定度,最后给出实验结果的正确表达式。同时,对实验中观察到的现象,特别是看似反常的现象进行分析,力求找出其成因。

以上三个环节的有关文字内容集中在一张实验报告纸上,构成一份完整的实验报告。写实验报告是对一个人的文字表达能力、归纳综合能力、分析判断能力的有效训练。整个报告要求格式规整,字迹清楚,文理通顺,语言简明,数据齐全,图表正确;并按时上交。

# I 实验基础知识

## 1 物理实验基本仪器与主要测量方法

物理实验的主要工作就是进行各种物理量的测量,所有的测量工作都无一例外地要借助一定的仪器、用具,采用适当的测量方法来进行。因此,了解物理实验工作中的仪器、用具及其正确使用方法,学会一些常用的测量方法,是十分必要的。物理实验中用到的仪器种类繁多,有通用的、专用的,有简单的、复杂的;测量方法也多种多样,不可能面面俱到地介绍。在本章中只对基本的仪器和主要的测量方法做一简单介绍。

### 1.1 物理实验基本仪器

#### 1.1.1 力学实验基本仪器

力学实验中,待测的基本物理量是长度、质量和时间。常用的仪器有游标卡尺、螺旋测微器(千分尺)、读数显微镜、天平、秒表、数字毫秒计等。

##### 1. 游标卡尺

###### 1) 结构

游标卡尺的基本结构如图 1-1-1 所示。图中  $D$  为主标尺, $E$  连同  $C$  构成副标尺,副标尺上的刻度部分称为游标, $F$  为主、副标尺之间的锁紧螺钉。

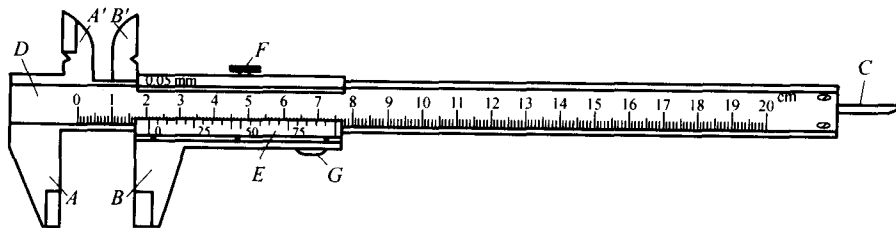


图 1-1-1 游标卡尺结构图

量爪  $A$ 、 $B$  的两个直线边用来从外部卡住待测部分,即测量物体的外边缘之间的长度,如圆柱体的直径,圆筒的外直径,柱体的高等; $A'$ 、 $B'$  的直线边用来从内部卡住待测物体,即测量物体的内边缘之间的长度,如圆筒的内径,圆孔的直径,缝的宽度等;杆  $C$  和主标尺的后端面是用来测量深度的。

###### 2) 工作原理(游标测微原理)

游标卡尺主标尺的刻度与以毫米为分度的米尺相同,即相邻刻线间的距离为  $1\text{ mm}$ ,

称为游标卡尺主标尺的分度。副标尺游标上的分度比主尺的分度略小,游标卡尺正是利用主、副标尺分度的微小差异来提高测量的精度,即借助于游标上的刻线帮助实验者比较准确地估计读出主标尺上整数分度以下的读数。常常用副标尺的刻线数(又称分度数)给游标卡尺命名,例如,副标尺的刻线数为10的游标卡尺称为十分游标,下面就用十分游标对游标卡尺的工作原理加以说明。

十分游标的副标尺游标上共有10根刻度线,其分度(相邻两刻线间的距离)为0.9 mm,10根刻线的总长度为9 mm,故当主、副标尺的零刻线对齐时,副标尺的第10根刻线与主标尺的第9根刻线对齐,如图1-1-2所示。

主、副标尺分度的差值称为此游标卡尺的分度值。十分游标卡尺的分度值为0.1 mm。在测量时,寻找主、副标尺对齐的刻线,如图1-1-3所示,副标尺的第7根刻线与主标尺的某一根刻线对齐,副标尺的第6根刻线比主标尺在其左边的一根刻线偏右了0.1 mm,副标尺的第5根刻线比主标尺的再往前的一根刻线偏右了0.2 mm,照此计算下去,副标尺的零刻线比主标尺上在其左边的刻线偏右了0.7 mm,而主标尺上在副标尺的零刻线左侧的这一刻线的读数为7.0 mm,因此,测得的长度应为7.7 mm。

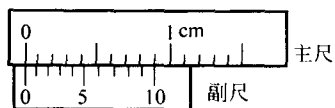


图 1-1-2 游标卡尺原理图

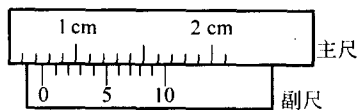


图 1-1-3 游标卡尺读数方法

将上述结果推广到一般情况:设主标尺上的一个分度为  $y$  (mm),副标尺的分度数为  $n$ ,分度为  $x$  (mm),则应有

$$nx = (n-1)y \quad \text{或} \quad x = \frac{n-1}{n}y$$

用  $\delta$  表示卡尺的分度值,则有

$$\delta = y - x = \frac{y}{n} \quad (1.1.1)$$

(1.1.1)式表明,游标卡尺的分度值等于主标尺的分度除以副标尺的分度数。如对于十分游标,主标尺的分度  $y=1$  mm,副标尺的分度数  $n=10$ ,则该卡尺的分度值  $\delta=0.1$  mm。若副标尺的分度数为20,则其分度值变为0.05 mm。

注意:请区分几个定义词:分度、分度数和分度值。

读取游标卡尺测量结果的方法为:若副标尺的零刻线位于主标尺的第  $k$  和  $k+1$  个刻度之间(从主标尺的零刻线开始数),副标尺上的第  $p$  个刻线(从副标尺的零刻线开始数)和主标尺上某一刻线对齐,则被测物体的长度为

$$L = ky + p\delta \quad (\text{mm}) \quad (1.1.2)$$

式中, $y$  为主尺的分度; $\delta$  为卡尺的分度值。

以上所说的游标卡尺工作原理称为游标测微原理。

### 3) 使用注意事项

(1) 使用前,先了解游标卡尺的规格、测量范围和分度值。

(2) 检查主、副标尺零刻线是否对准。正常情况下,当量爪 A、B 靠拢时,主、副标尺上的零刻线应该对齐,若没有对齐,应该读出两条零刻线间的距离  $L_0$  (读取方法与上同)。在这种情况下,若测量的结果为  $L'$ ,则物的实际长度为

$$L = L' - L_0 \quad (1.1.3)$$

$L_0$  的值可正、可负。当量爪 A、B 或 A'、B' 的直线边合拢时,若副标尺的零刻线在主标尺的零刻线左边,  $L_0$  取负值,反之取正值。

(3) 被夹在量爪内的物体不要用力移动,以免损坏量爪。一般情况下也不要用量卡尺测量表面粗糙的物体。

(4) 移动副尺时,先把紧固螺钉 F 松开一些,当已把物体夹住时,再轻轻拧紧。

#### 4) 角游标

游标测微原理不仅用来精确测量直线长度,而且可以用来精确测量角度。用来精确测量角度的游标称为角游标。物理实验中分光计的测角盘用的就是角游标。相应地也称测直线距离的游标为直游标,两者的工作原理是一样的。

图 1-1-4 是角游标的示意图。角游标有一个圆刻度盘(弧形主尺)和一个可以沿着圆

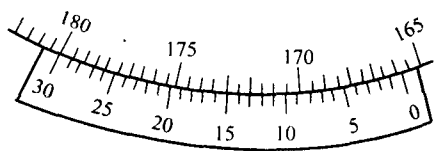


图 1-1-4 角游标示意图

刻度盘同轴转动的小弧形标尺构成,主标尺上最小分度  $\theta$  为  $0.5^\circ$ ,即  $30'$ 。游标上刻有  $n$  个分度(一般  $n=30$ ),每个分度的角度值为  $\alpha$ ,它们之间有如下数值关系:

$$nR\alpha = (n-1)R\theta \quad (1.1.4)$$

当把  $\theta$  和  $\alpha$  的单位认为“rad”时,表明小弧形标尺上刻度的总弧长与主标尺上  $n-1$  个分度的弧长相等,其中  $R$  为弧的半径。因此,角游标的精度,即角游标的分度值

$$\delta = \frac{\theta}{n} \quad (1.1.5)$$

角游标的读数方法与直游标相同。在图 1-1-4 中,读数为  $165^\circ 45'$ 。

## 2. 螺旋测微器(千分尺)

### 1) 螺旋测微器的结构及工作原理

螺旋测微器因为它的测量精度  $\delta$  可以达到毫米的千分位( $0.004 \sim 0.006$  mm),所以又叫千分尺,而游标卡尺的精度只能达到  $0.01$  mm。千分尺是利用螺旋进退代替直线进退达到了提高测量精度的目的。

千分尺的结构如图 1-1-5 所示,由一根精密的测量螺杆和与它配套的螺母套筒两部分组成。螺杆的后端连接一个可以旋转的微分套筒,微分套筒每旋转一周,螺杆前进(或后退)一个螺距。若微分套筒上的分度数为  $n$ ,对于螺距为  $x$  (mm) 的千分尺,微分套筒每转动一个分度,螺杆移动的距离为  $\frac{x}{n}$  (mm)。在图 1-1-5 中,螺距  $x=0.5$  mm,微分套筒圆周上的分度数  $n=50$ ,微分套筒每转动一个分度,螺杆移动距离为  $\frac{0.5}{50}=0.01$  mm。读数时,若微分套筒的刻线没有与螺母套筒的准线(与轴平行的直线)对准,在千分位上应给

出估计读数值,如图 1-1-6 的读数应为 10.497 mm。

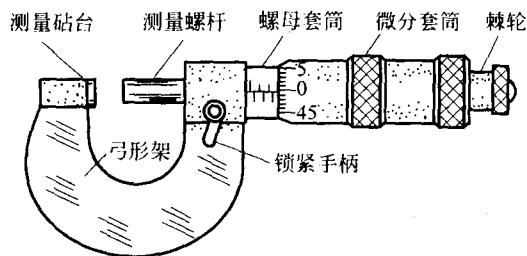


图 1-1-5 螺旋测微器

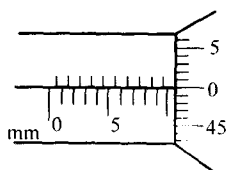


图 1-1-6

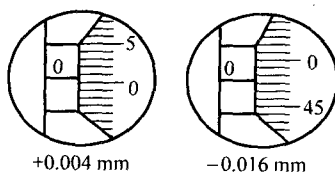


图 1-1-7 螺旋测微器的零点读数

## 2) 使用方法

用左手拿住螺旋测微器的弓形架,用右手轻轻转动微分套筒,螺杆随之移动,在测量螺杆接近测量砧台时,右手改为转动棘轮,当测量螺杆与砧台接触时,可听到“咯咯”声响,即停止转动棘轮(以免损坏螺纹)。此时螺杆与砧台合拢,即可进行读数。

使用螺旋测微器时同样存在零点问题。螺旋测微器的零点正确时,微分套筒的零线应对准螺母套筒的准线,如未对准,就要读出零点读数,在结果中应将其扣除。公式与游标卡尺的相同,顺刻度方向读出的零点读数记为正值,逆刻度方向读出的零点读数记为负值,图 1-1-7 示出了两种情况的零点读数。

千分尺在使用完毕后,应使精密螺杆和砧台间留有一定的间隙,以免受热膨胀而损坏螺纹。

## 3. 读数显微镜

读数显微镜是精确测量微小物体长度的仪器,它由一台显微镜和一个测量台组成。测量台的上平面装有水平刻度尺,刻度尺的长度决定测量范围,有的只有 50 mm,有的可达 250 mm。台上装有一根精密螺杆,螺杆的一头固定有一个读数鼓轮,转动读数鼓轮,螺杆随之转动。显微镜筒固定在一块可以沿着水平方向滑动的平板上,螺杆转动的同时带动平板和显微镜筒平移,平板上的准线随之沿着水平刻度尺滑动,相当于游标卡尺游标的零线。由平板准线所在处水平刻度尺的读数和鼓轮的读数即可给出一个测量位置。

水平刻度尺的分度(最小刻度间距)为 1 mm,当读数鼓轮圆周上的分度数为 100 时,鼓轮每转动一个分度,显微镜移动距离为

$$\delta = 1 \times \frac{1}{100} = 0.01 \text{ mm}$$

它就是读数显微镜的分度值。

使用时,先按显微镜的使用方法,将载物台上待测小物的像调清楚。转动鼓轮,让叉丝移到待测位置的一侧,然后再反向转动鼓轮,让叉丝线逐渐靠近待测位置,直到与此位置的这一侧相切,记下水平尺与鼓轮的读数,此为初始位置读数。再继续沿同一方向转动鼓轮,直到叉丝线与另一待测位置相切,记下此时的水平尺与鼓轮读数,此为末位置读数,两个读数之差,即为待测物体的长度。

使鼓轮始终沿一个方向转动的目的是为了防止回程误差,即从一个方向的转动改为另一个方向的转动时,会出现一定的空程,即鼓轮虽转动,但平板不动。

#### 4. 天平

称量物体重量(质量)的常用仪器之一是天平,按称量精度的不同,有托架天平、物理天平和分析天平,它们的工作原理都是平衡原理。对于高精度的天平,使用时应严格遵守操作规程和注意事项。近些年,利用压力传感器和微机技术制成的各种电子秤,成为热门的称重仪器,其使用比较简单。

#### 5. 秒表与数字毫秒计

计时仪器多用秒表和数字毫秒计。数字毫秒计工作原理涉及到较多的电子学知识,超出本书范围,使用方法随仪器有使用说明,会在具体实验中说清,此处不再多讲。

### 1.1.2 电学实验基本仪器

电学实验中待测的基本电学量为电路中的电压和电流,涉及到的基本仪器包括:电源、电表和变阻器。

#### 1. 电源

供实验用的电源有两种:交流电源和直流电源。

##### 1) 交流电源

交流电源即电压、电流的大小随时间作周期性变化的电源。因此,对一个特定的交流电源的描述包括它的频率、波形和峰值 3 个内容,要确定这 3 项内容,须使用示波器。交流电的代表符号为“~”或 AC。

(1) 市电,即工业和生活用电,也是实验室的主要电源。我国市电的频率为 50 周(或称赫[兹])。输送到实验室的为五线三相制的动力电。这 5 根输电线中,一根与大地连接,称为地线,地线的作用是把用电器的金属外壳与大地相连,以确保人身安全。另外 4 根中有 3 根是相线,俗称火线,余下一根是零线。每根相线与零线之间电压的有效值(交流信号振幅的  $1/\sqrt{2}$ )为 220 V。每一根相线与零线均构成一路单相电源。物理实验用到的基本上都是单相电源。两根相线之间的电压有效值为 380 V,称为相间电压。一些用电功率较大的设备常使用 380 V 电源,这时,三根相线要同时使用,故称为三相电源。使用三相电源时随接法的不同,有时要用到零线,有时则不用零线。值得强调的一点是:交流市电只有单相和三相,不存在两相电。

(2) 变压器。为了获得满足不同大小要求的电压,可以使用调压器或变压器。调压器又称自耦变压器,其工作原理如图 1-1-8 所示。220 V 市电加到调压器的输入端时,在输出端可以获得 0~250 V 连续可调的电压。

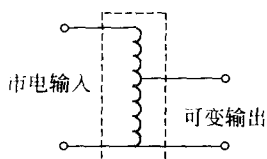


图 1-1-8 调压器原理图

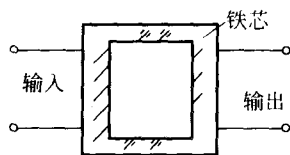


图 1-1-9 变压器原理图

变压器可以使市电变为指定的电压值(升压或降压均可),如图 1-1-9 所示。变压器由闭合铁芯(由硅钢片制成)和绕在其上的两个彼此独立的线圈组成,构成四端器件,两两分别组成输入端和输出端。输入端线圈称为原线圈,设其匝数为  $N_1$ ,输出端线圈称为副线圈,设其匝数为  $N_2$ ,输入电压  $V_1$  与输出电压  $V_2$  之比等于两线圈匝数之比,即  $V_2 : V_1 = N_2 : N_1$ 。 $N_2 > N_1$  时为升压, $N_2 < N_1$  时为降压。变压器利用的是互感原理,铁芯材料的损耗很小,所以变压器几乎不消耗电能。由于原、副线圈独立,所以用变压器可以把用电器和市电隔开,比调压器安全。由于铁芯材料具有磁滞特性,变压器会使电压波形发生少许畸变,这是它的不足之处。

(3) 低频信号发生器。低频信号发生器可以根据需要输出各种频率、幅值和波形的交流电。频率可以从数十赫到数百赫范围内连续可调;波形一般有正弦波、方波、锯齿波和三角波。信号发生器提供的功率较小,最大也不过数瓦。

## 2) 直流电源

实验室用的直流电源主要有直流稳压电源和干电池,有些对电流有特殊要求的地方,要用到直流稳流电源。直流电的代表符号为“—”或 DC。

目前物理实验室普遍采用晶体管稳压电源,这种电源的稳定性高,内阻小,输出连续可调,使用方便。其性能指标包括最大输出电压和最大输出电流,如 DHJ18-BDC 型,最大输出电压为 30 V,最大输出电流为 2 A;DHJ-15HA 型,最大输出电压为 30 V,最大输出电流为 0.5 A。使用时,不能超限。直流稳压电源是对市电进行变压、整流、滤波和稳压处理后得到的。

在小功率、稳定度要求又不高的场合,干电池是很方便的直流电源。干电池每节的电动势为 1.5 V,使用时,根据需要的不同,可以几节串联起来使用,如用两节提供 3 V 直流电,用三节提供 4.5 V 直流电,用四节提供 6 V 直流电等。有时也将多节串接制作为一体,即为积层(或叫迭层)电池,常用的积层电池的电压为 9 V 和 12 V。干电池随使用时间的加长,其电动势不断下降,内阻不断上升,最后由于内阻很大,不能再提供电流,电池即告报废。干电池的电动势在降到 1.3 V 时就不能再使用了。

在要求负载电阻值在一定范围内变化时保持电路中电流不变的情况中,要求使用直流稳流电源。直流稳流电源的输出电流也是连续可调的,但对于选定的输出电流,只要保证负载电阻值的变化在规定的范围内,电流将保持不变。

## 2. 电表

电表一般是指测量电路中的电压或电流的仪表,因此也有交、直流之分。此外,按照其指示方式的不同,又有指针式和数字式之分。指针式电表是直接按电磁相互作用原理

制成的,数字式电表则是利用电子电路的功能来实现的。

### 1) 指针式电表

指针式电表大部分都是磁电式的,内部结构(俯视图)如图 1-1-10 所示。其工作原理

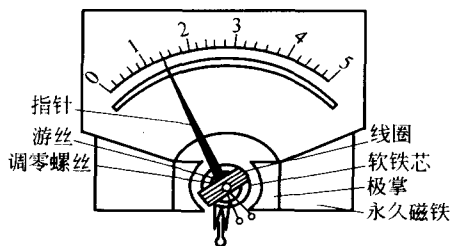


图 1-1-10 指针电表结构简图

是:可以自由转动的线圈放在永久磁铁的磁场内,当线圈中有电流通过时,由于受到磁力矩的作用而转动。同时,与之相连的弹簧游丝又给线圈一个反向恢复力矩,当两个力矩大小相等时,线圈即停止在某一平衡位置,该位置所转过的角度由跟随线圈转动的指针指示。偏转角度的大小与流过线圈的电流的大小成正比。

具有上述基本结构的电表称为表头。在表头上添加适当的电路,即可构成测量不同范围电流或电压的电表:电流表和电压表。

标志电表规格的参量有:精度等级、量程和内阻。量程指的是此时满刻度所代表的最大测量值。内阻指的是两条接线之间电表内的电阻。电表的精度等级按国家标准分为 0.1, 0.2, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 5.0 七级,数值越小的精度等级越高。

(1) 检流计。检流计又称直流电流计,即为仅具有基本结构的磁电式电表。为了提高灵敏度,常添加反光镜等光学部件,构成灵敏电流计。电路中检流计用符号 G 表示。

检流计的用途之一是检测电路中的微小电流及其流过方向,不同规格的检流计的电流常数范围为  $10^{-6} \sim 10^{-12} \text{ A/div}$  (div 指的是表盘上的一小格)。灵敏检流计多用来检测微小的电流。检流计的另一个用途是检测电路中有无电流(例如在电桥、补偿电路中),因此又称为示零器。用作示零器的检流计,其零点位置一般均刻度在表盘的中央,指针可以向左、右两个方向偏转,使用前应调节零点,称为机械调零,通过旋动图 1-1-10 中的调零螺丝来完成。检流计的两个接线端子(接线柱),一般分别标有“+”,“-”符号,分别为电流的流入端和流出端。

无论哪种检流计,允许通过的电流都是非常小的,最大值也只在  $10^{-6} \text{ A}$  量级,电流过大,会损坏电表。因此,检流计在使用时,常在电路中串联一个阻值较大的可变电阻,称为保护电阻,如图 1-1-11 所示的电阻  $R_G$ 。在测量时,先让  $R_G$  处于阻值较大状态,当电流已接近零时,再逐渐减小  $R_G$  的值。检流计的内阻约数百至上千欧。

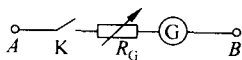


图 1-1-11 检流计支路接线示意图

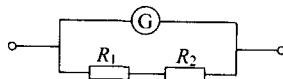


图 1-1-12 微安表示意图

(2) 直流电流表。在检流计的线圈上并上一定的电阻,就构成直流电流表。直流电流表按其所测电流的大小分为微安表( $\mu\text{A}$ ),毫安表( $\text{mA}$ )和安培表( $\text{A}$ )。

图 1-1-12 为一个微安表的示意图,可以测量  $0 \sim 1 \text{ mA}$  ( $1000 \mu\text{A}$ ) 的电流。一个 0.5 级的微安表一般具有 5 个量程: $0 \sim 50 \mu\text{A}$ ,  $0 \sim 100 \mu\text{A}$ ,  $0 \sim 200 \mu\text{A}$ ,  $0 \sim 500 \mu\text{A}$ ,  $0 \sim 1000$

$\mu\text{A}$ (又常记为  $0\sim 50\ \mu\text{A}\sim 100\ \mu\text{A}\sim 200\ \mu\text{A}\sim 500\ \mu\text{A}\sim 1000\ \mu\text{A}$ )。不同量程的分度(即一个小格代表的电流值)不同,最小的分度为  $0.5\ \mu\text{A}$ 。微安表的内阻约几百欧。

在微安表上并联上不同的电阻,由于电阻的分流作用,使之可以测更大的电流,构成毫安表(mA)或安培表(A)。毫安表的测量范围为  $0\sim 1000\ \text{mA}$ ,0.5级毫安表一般具有4个量程: $0\sim 100\ \text{mA}\sim 200\ \text{mA}\sim 500\ \text{mA}\sim 1000\ \text{mA}$ 。安培表一般用于测量最大值可能大于1A的电流。毫安表的内阻约几十欧,安培表的内阻都在  $0.1\ \Omega$  以下。

(3) 直流电压表。将微安表串联不同的电阻就可以得到不同量程的电压表。按所能测量电压的大小,电压表分为毫伏表(mV),伏特表(V),千伏表(kV)。其量程标记与电流表相同,如一个伏特表具有3个量程: $0\sim 2.5\ \text{V}\sim 10\ \text{V}\sim 25\ \text{V}$ 。电压表的内阻都比较大,一般用每伏欧姆数( $\Omega/\text{V}$ )表示,计算其内阻的公式为

$$\text{内阻} = \text{量程} \times \text{每伏欧姆数}$$

若  $0\sim 2.5\ \text{V}\sim 10\ \text{V}\sim 25\ \text{V}$  的伏特表的每伏欧姆数为  $10\ \text{k}\Omega$ ,则在使用  $0\sim 2.5\ \text{V}$  量程时,其内阻为  $25\ \text{k}\Omega$ ,使用  $25\ \text{V}$  量程时其内阻为  $250\ \text{k}\Omega$ 。

知道了表头的内阻后,便可以通过计算,对其并联或串联上适当的电阻,将表头改成不同测量范围的电流表或电压表。

使用直流电表时应注意以下几点。

① 正确选择量程:根据待测电流或电压的大小,选择合适的量程。若量程太小,过大的电流或电压会将电表损坏;量程过大,则指针偏转太小,使读数不准确。

② 注意电表极性:除示零用检流计以外,所有直流电表的输入端都有正、负极性之分。单量程的电表,正、负极性的标志符号分别为“+”、“-”。多量程的电表,有多个接线柱,其中一个接线柱旁边标有符号“-”,为负极,其余的全为正极,标有该量程的最大值。

③ 正确连接电表:使用电流表时,必须串联在待测电流的电路中,使电流从正极流入,从负极流出。使用电压表时,必须并联在被测电压的两端,使其正极与高电位端相连,负极与低电位端相连。

④ 正确读取数值:在电表接入电路之前,先检查电表的机械零点,如零点不准,调节表面的调零螺丝,将零点调零,以消除零差,在读数时,视线应与刻度面垂直,以尽量减小视差。较精密的电表其刻度标尺下的槽内装有反光镜,读数时,让指针与它在镜中的像重合。读数的其他要求,如估读问题,将在1.2.1节中介绍。

(4) 交流电表。指针式交流电表以晶体管整流式为主。它的主体是一个磁电式电表(直流电表),附加半导体二极管作为整流元件,整流元件把交流电变成单向脉动电流,具体分全波整流和半波整流两种情况。由于磁电式电表线圈的偏转角与通过它的电流  $I$  成正比,故平均偏转角(即一个周期的平均电流),就是电表的灵敏度。

虽然整流式电表的偏转取决于电流的平均值,但电表表面仍按简谐交流电的平均值和有效值的换算关系用有效值进行刻度。所以,对于简谐交流电,电表直接读出的是它的有效值。它们的换算关系为:

半波整流                      有效值(面板刻度的值) = 平均值/0.45

全波整流                      有效值(面板刻度的值) = 平均值/0.90

整流式电表可以做成不同量程的电流表和电压表(加分流电阻或扩程电阻),交流电