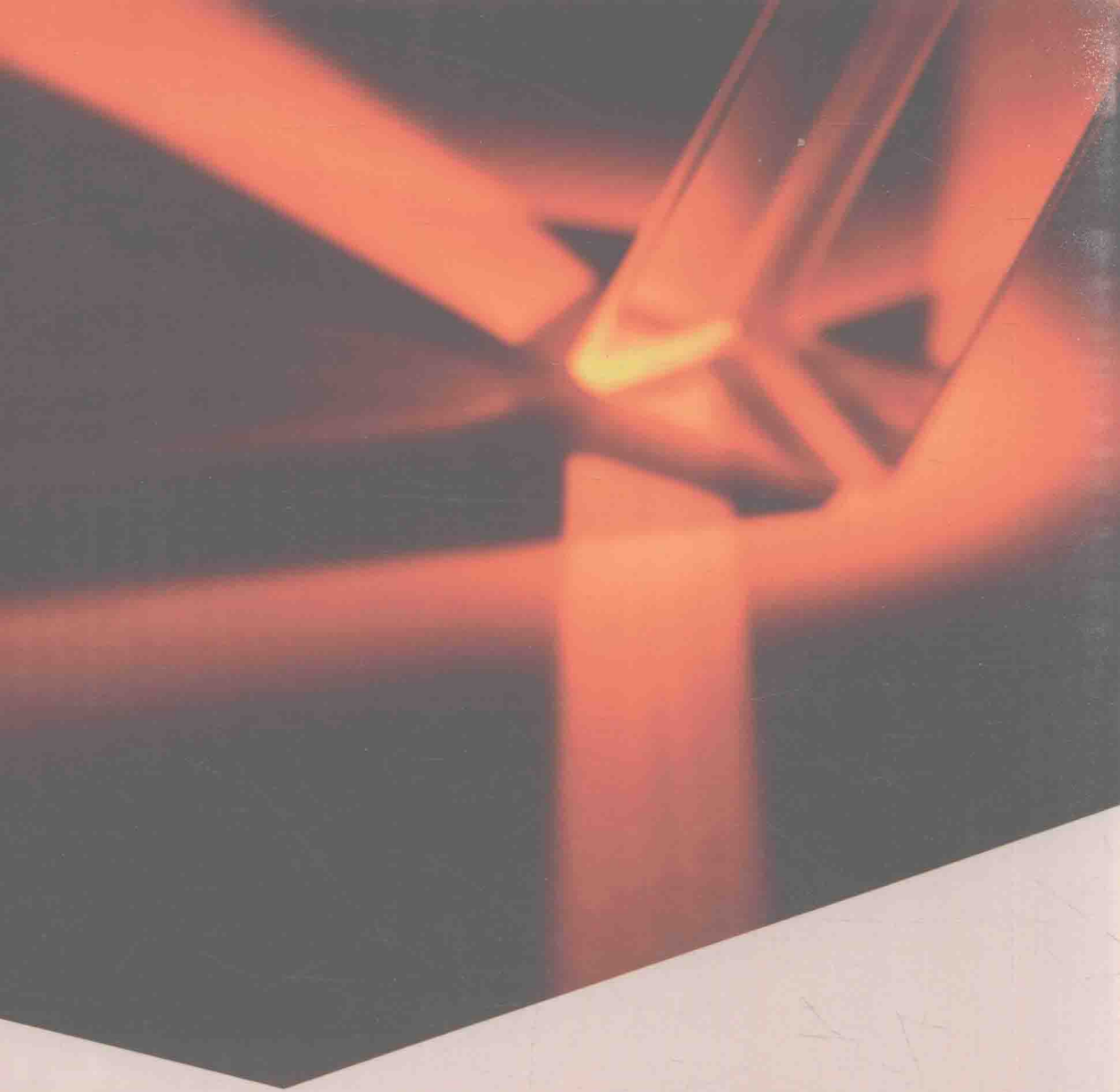




# 医学物理学实验

Yixue Wulixue Shiyan

刘贵勤 孔繁之 主编

山东大学出版社

# 医学物理学实验

刘贵勤 孔繁之 主 编

山东大学出版社

**图书在版编目(CIP)数据**

医学物理学实验/刘贵勤,孔繁之主编. —济南:  
山东大学出版社,2016.9  
ISBN 978-7-5607-5591-5

I. ①医… II. ①刘…②孔… III. ①医用物理学—  
实验—医学院校—教材 IV. ①R312-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 195361 号

山东大学出版社出版发行  
(山东省济南市山大南路 27 号 邮政编码:250100)  
山东省新华书店经销  
泰安金彩印务有限公司印刷  
787×1092 毫米 1/16 8 印张 185 千字  
2016 年 9 月第 1 版 2016 年 9 月第 1 次印刷  
定价:16.00 元

**版权所有,盗印必究**

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社营销部负责调换

## 《医学物理学实验》编委会

|     |     |     |     |     |     |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 主 编 | 刘贵勤 | 孔繁之 |     |     |     |
| 副主编 | 任忠夫 | 康永香 | 王文斌 | 桂维魁 | 孟凡彬 |
|     | 刘 娴 | 范怀玉 | 崔 斌 |     |     |
| 编 委 | 刘贵勤 | 孔繁之 | 任忠夫 | 康永香 | 王文斌 |
|     | 孔庆胜 | 刘 娴 | 桂维魁 | 范怀玉 | 任宪东 |
|     | 孟凡彬 | 李鸿梅 | 韩珍珍 | 王 颖 |     |

## 前 言

《医学物理学实验》是全日制医学类高等院校的普通物理实验教科书,是“面向 21 世纪教材改革——普通物理学实验”教材编写的成果。本书在编写过程中结合了济宁医学院物理教研室普通物理实验建设和发展的实际情况,是一本包含力、热、电与磁、光在内的适合新时期由“应试教育”向“素质教育”过渡的《医学物理学实验》教材。每个实验含有实验原理、实验仪器、实验内容(包括实验方法)以及实验结果等内容,并附有思考题。为教学工作和学生学习提供了方便。

本书的编写符合教育部高校教材编写的最新要求,总结和吸收了多年来高校物理实验课程建设的实践经验,规范统一了有关名词、单位和符号,从而使本书具有了科学化、规范化的特点。本书可作为医学类院校的物理实验教材,也可供电视大学、函授大学、职工大学学生使用,亦可作为专科或者其他从事物理实验的工作人员的参考书。由于编者水平有限,加之时间仓促,书中不足之处在所难免,望各位同行热心指点,在此深表谢意。

作 者

2016 年 8 月

# 目 录

|                      |       |
|----------------------|-------|
| 绪 论                  | (1)   |
| 第一节 物理实验的意义、任务、内容及要求 | (1)   |
| 第二节 怎样学好、做好物理实验      | (7)   |
| 第三节 误差理论及其应用         | (8)   |
| 实验 1 万用电表的使用         | (29)  |
| 实验 2 示波器的使用          | (34)  |
| 实验 3 晶体管助听器          | (39)  |
| 实验 4 晶体管放大器          | (41)  |
| 实验 5 交流电路            | (44)  |
| 实验 6 用惠斯登电桥测电阻       | (47)  |
| 实验 7 模拟直流电离子透入疗法     | (51)  |
| 实验 8 液体黏滞系数的测量       | (54)  |
| 实验 9 液体表面张力系数的测量     | (59)  |
| 实验 10 长度的测量          | (65)  |
| 实验 11 用显微镜测量微小物体的长度  | (72)  |
| 实验 12 声速测量           | (75)  |
| 实验 13 非正常眼的模拟与纠正     | (82)  |
| 实验 14 用分光计测量棱镜折射率    | (87)  |
| 实验 15 光波波长的测定        | (92)  |
| 实验 16 牛顿环实验          | (97)  |
| 实验 17 杨氏弹性模量的测定      | (103) |
| 实验 18 薄透镜焦距的测定       | (108) |
| 实验 19 望远镜和显微镜的组装     | (114) |

# 绪 论

## 第一节 物理实验的意义、任务、内容及要求

### 一、物理实验的意义与任务

物理学的形成与发展是以实验为基础的。物理学的研究方法通常是在观察和实验的基础上,对物理现象进行分析抽象概括总结,从而建立物理定律,进而形成物理理论,然后再回到实验中去经受检验。即实验是物理科学的基础,也是物理知识的源泉,加强物理实验是物理教学的时代特征,又是提高物理教学质量的先决条件。

在研究物理现象时,实验的任务不仅是观察物理现象,更重要的是找出各物理量之间的数量关系,找出它们变化的规律。任何一个物理定律的确定,都必须依据大量的实验材料。即使已经确定的物理定律,如果出现了新的实验事实和这个定律相违背,那么便需要修正原有的物理定律或物理理论,因此我们说,物理实验是物理理论的基础,它是物理理论正确与否的试金石。物理实验既为开拓新理论、新领域奠定基础,又是丰富和发展物理学应用的广阔天地。最近数十年来,物理学和其他学科一样发展很快,尤其是核物理、激光、电子技术和计算机等现代化科学技术的发展,更反应了物理实验技术发展的新水平。随着科学技术的发展越来越体现出物理技术的重要性,基于这方面的原因,人们逐渐感到理工科及师范院校加强对学生进行物理实验训练的重要性。理论课是进行物理实验必要的基础,在实验过程中,通过理论的运用与现象的观测分析,理论与实验相互补充,以加深和扩大学生的物理知识。

物理实验是高校理科进行科学实验训练的一门基础课程,是各专业后继实验课程的基础之一,也就是说,它是大学生从事科学实验工作的入门的课程。它的主要任务是:

(1)学习物理实验的基础课程,包括一些典型的实验方法及其物理思想。例如,电磁学实验中的模拟法、伏安法、电桥法、补偿法以及冲击法等,有助于思维与创造能力的培养。

(2)使学生获得必要的实验知识和操作技能,培养学生初步具有正确使用仪器进行测量、处理数据、分析结果以及编写报告等方面的能力。

(3)培养学生严格、细致、实事求是、刻苦钻研、一丝不苟的科学态度,以及爱护国家财产的道德品质;培养学生善于动脑、乐于动手、讲究科学方法、遵守操作规程、注意安全等良好习惯。

总之,教学的重点应放在培养学生科学实验能力与提高学生科学实验素养方面,使学

生在获取知识的自学能力、运用知识的综合分析能力、动手实践能力、设计创新能力以及严肃认真的作风、实事求是的科学态度等方面得到训练与提高。

## 二、物理实验的形式及其内容

与物理学发展的同时,实验综合了科学技术的成就,发展形成了自身的科学体系,成为系统性较强的独立学科——实验物理学。它在内容上包括了许多物理课本所包括不了的物理知识、方法和技能,主要归纳有以下几个方面:

(1)实验手段(仪器、设备)的发展。表现在从简单的测量仪器,发展为以机、电、光为实验的门类齐全、并日益扩展的仪器系列。精确度不断提高,使用范围不断开拓,自动化程度不断提高等。遥感、遥控、遥测技术的应用,使仪器已经从简单的物理原理脱胎出来,成为独立体系。

(2)从对现象的观测、实验方案的设计、过程控制以及资料分析、结果归纳等一系列方法,在前人积累和现代科学技术的基础上,发展成较完整的系统。

(3)综合了教学、物理等学科的成就,形成了实验的数据处理、误差分析的严格理论体系,并已有效地指导着实验的各个环节使之顺利进行。

(4)为解决各种精确测量和精密实验中的实际问题,综合利用了多专业学科和多种专业技术的交叉,形成了实验物理学的独立科学技术体系。

## 三、电磁学实验课的要求

电磁学实验中,多数实验要涉及电学线路。为了正确地连接线路和进行操作,现提出如下要求:

(1)看懂电路图,把电路中的符号与实物对号,弄清电路中各器件的性能,并能正确使用。

(2)按照电路图摆放器件时,把读数的仪器放在离观察者最近的地方,把需经常调节的仪器放在便于操作的地方。

(3)把所有的开关打开。用作限流的滑线变阻器的阻值取最大;用作分压的滑线变阻器的阻值取最小。直流稳压电源、调压变压器等仪器的电压输出旋钮应逆时针旋转到底,使输出电压为零。对多量程的电流表、电压表要选择合适的量程。

(4)连接电路时可采用回路接线法,即从电源正极出发,沿着电流的方向依次接线,接好一个回路,再接好下一个回路,直至完全接完。

(5)电路接完后须仔细核对,然后经教师检查后方可接通电源,接通电源后应注意观察电路中各器件,如有异常应立即切断电源,从新检查电路。在实验过程中要改接电路必须先断开电源。

(6)电路正常后,不要匆忙测读数据,先全面观察,看是否达到预计实验范围,观察整体的规律,并考虑实验数据应如何合理分布,完成观察后再测读数据。

(7)做完实验后不要忙于拆线路,应先分析数据是否合理,有无漏测和可疑数据,必要时及时重测或补测。确认无误后方可拆线。拆线前应先将电源电压调至为零,然后切断电源开关,再开始拆线,并整理好仪器用具。

#### 四、光学实验预备知识

光学实验有两个突出的特点。其一是光学仪器和零件加工精密且容易损坏;其二是光学实验系统的调节比较严格,操作比较困难。为了帮助学生在妥善地保护仪器前提下正确使用仪器,真正学好光学实验理论与技术,特安排《光学调整技术》和《光学仪器的使用和保养》两项内容作为预备知识。

##### (一)光学调整技术

在光学实验中,调整光学仪器和装置十分重要,经常要完成的调整工作有以下几项:

##### 1. 光学仪器的校准

光学仪器校准有被校准、自校准和互校准三种方法。被校准就是由一个作为基准的仪器校验待校准的仪器。如用一架已经对向无穷远的望远镜校准平行光管,使之出射平行光就是被校准过程。被校准是应用最多的校准方法。在光学系统调节中首先弄清哪个是基准,对谁进行调节,应该出现什么现象,然后再动手操作,就会取得事半功倍的效果。

自校准是应用自身的设置校准自身状态的一种方法。最典型的例子就是自准直平行光管(或者准直望远镜)的自准调节过程。

互校准是指待校准的双方均未达到标准状态,而又根据二者之间的相互关系进行校验的调节方法。比如,在平行光管调节中,一边调分划中心的横向位置,一边调反射镜的角度,使分划中心处于光轴上的调节就是一例。因为在互校准的过程中,谁都不处于标准状态,因此必须采用互为参照,相互逼近的调节方法(有时简称各调一半法)。

##### 2. 光学元件的共轴调节

(1)在光具座上应用激光做实验,调节要领为:以导轨为准,调节激光束的方向平行于导轨。用一光屏检查,当光屏沿导轨平稳地移动较长一段距离时,若屏上激光斑点的中心位置不变,则表明调节达到要求。

以激光束为准,依次放置并调节各元件共轴。元件要保持正直(根据目测判断)。

(2)在光具座上采用普通光源做实验(以正透镜成像为例)应以光具座的导轨为准。调节要领为:目视调节,使光源、物体、透镜和光屏的中心大致等高共线,各元件均不倾斜。

适当改变物、镜、屏的相对位置,使屏上出现清晰放大的(或缩小的)物体的像。然后平移透镜,使屏上再次出现缩小(或放大)的物体像。若两次成像的中心位置不变,说明系统共轴。

(3)安排二维光路(如全息照相光路)要领为:以平台面为准,调激光光束的俯仰,使光束平行于台面。要求当光屏在滑动较长的一段距离时,屏上光斑的中心应保持同一距离。放置其他元件时,应使经反射或折射后的光束保持原高度,经透镜扩束形成的光维轴线亦保持原高度。

(4)一个光学系统常常包括主机和附件两部分,或者一个复杂的光学系统中有一部分元件构成一个固定的光学系统。在这种情况下,共轴调节应以主机光路或固定系统的光路为基准,使其他元件处在主机光路(或固定光路)的光轴上,如调节光谱仪器的照明光路时,即应以仪器的内光路为准,先放光源,后放聚光镜。检查各元件是否与仪器共轴,可由出射光谱线的明亮程度判断。

##### 3. 判断像的准确位置

按照高斯物象公式,像与物是共轭的,只有在共轭像面上才能得到理想的像。但是,由于成像元件的口径有限(即成像光束的孔径角有限),人眼的分辨能力有限(约分辨 $1'$ 的视角,相当于在明视距离处 $0.07\text{mm}$ 的距离)。即使把接收实物的屏幕放在比共轭像面稍前(或稍后)一点的位置上,肉眼仍能观察到清晰的像。处在共轭面附近,能够得到清晰像的这个纵深范围就是成像系统的实际焦深(焦深的大小和观察者对像的分辨能力有关。当用高分辨率仪器观察时,焦深会大大缩小)。为了准确地定出共轭像面位置,必须有意识地找到焦深范围,即向前向后移动光屏,找到两个像开始变模糊的位置。两位置之间的距离即为焦深。焦深范围的重点就是共轭像面的位置。

#### 4. 测量显微镜的调焦和使用

测量显微镜一般是立式的。它的镜体包括物镜和目镜。在目镜的前焦面附近装有十字形分划板,测量中用它来瞄准待测目标。由于被观察的目标到物镜的距离(称为工作距离)很短(略大于物镜的截距),因此物距的轻微改变就能引起最终的长距离移动。这给调焦带来了困难,经常会出现找不到目标像甚至使镜头撞击目标的现象。正确的调焦方法是:

(1)调节光源及反射镜位置,照亮目标,使目标的反射光或透射光能进入显微镜。

(2)旋转(或推拉)目镜,直到能清晰、舒适地观察到十字分划的像,这称为视度调节。

(3)在镜侧监视,将镜体缓缓下降,直至刚刚不接触目标为止。

(4)经目镜观察视场,并慢慢地转动调焦手轮使镜体升起,当看到模糊的目标像时应仔细调节,直至目标像清晰且和十字分划无视差。

测量显微镜测量长度是依靠螺旋推进器带动镜体(或放置目标的载物台)沿导轨横向移动实现的。为了测出两平行线间的距离,必须使平行线垂直于导轨方向。为此,可先使十字分划的横线平行于导轨。做法是:

(1)将一张画有直线的白纸放在物台上。通过显微镜观察并调节直线位置,使十字丝叉重合在直线上。

(2)转动螺旋推进器,若叉丝离开直线,再调整直线位置,仍使二者重合。

(3)重复Ⅱ的操作,直至转动推进器时,叉点能够沿直线从一端运动到另一端,直线便平行于导轨。

(4)将十字丝横线转至和直线平行。

(5)当测量两平行直线的间隔时,只需要将平行线调至和十字分划竖线平行即可。为了测量一个圆的直径,只要沿着同一方向转动推进器手轮。依次使竖分划线和两端的圆弧相交于一点。

#### (二)光学仪器的使用和保养

(1)光学仪器应在洁净、干燥的环境中使用和保存,温度也不宜过高。

(2)仪器放置时要注意仪器箱的内壁结构以及各部件的安放位置和方位。取出时先取附件(如镜头、试管箱、变压器等)后取主机;放回时先按原来的状态放置主机而后放置附件。

对备用仪器要装箱或加罩,并定期检查和保养。仪器箱(或仪器壳)内的干燥剂要及时烘干,以保持去潮能力。在活动的金属部件间隙可滴入少量的润滑油。

(3)换仪器位置之前必须把所有可能脱落的部件取下。搬动时要注意施力点的位置,并轻起轻落,安放要稳妥。

(4)用光学仪器须首先弄清其结构、原理和操作方法。要做到不该调节的部件不调,应该调节的部件也要适量。调节时一般不用太大的力气,调不动时应查找原因。使用仪器的专用灯泡要特别注意它对电源的要求。

(5)不触摸光学仪器或零件的光学表面(即经过抛光或镀膜的透光面和反射面)。夹持透镜、面镜、光栅等要掐边缘,拿取棱镜要捏上下底。

(6)不要对着光学仪器或零件哈气,以防含有机物的水汽玷污光学表面使之生霉发霉。

(7)为了保持仪器的良好性能,不具备装调和检验条件时,绝不可拆卸仪器,也不得用手或其他东西捅光学镜筒,以防损坏筒内的精密设施(如叉丝、分划板、反光片、小棱镜等)。

(8)发现仪器零件的表面不清洁时,切不可随意地找些纸或布(如手帕)擦拭。如要处理可按下述方法进行:

① 用汽油或酒精擦去金属部件或保护玻璃上的油物(切勿将溶液渗入镜头中间,以防损坏镜头表面的敷膜或使胶合透镜开胶)。

② 用橡皮吹风除掉镜头表面上的纤维或浮灰。

③ 未镀膜的光学表面上如有附着力不强的斑点,可用专用镜头刷、镜头纸或麂皮等柔软清洁的材料轻轻拂去。压力不宜过大,也不要重复擦拭,以防中间的砂粒划伤光学表面。

④ 抛光的玻璃表面(如某些镀膜面)上如有油污、斑痕,可用50%的无水乙醇与50%的无水乙醚混合液处理。首先用脱脂棉球蘸一下溶液,并在洁净的纱布上挤去多余的液汁(液汁过多不易干燥,还会留下擦痕),沿着一个方向轻轻擦拭一部分表面,而后再用棉球的另一侧擦拭其他部分(切勿重复使用)。

⑤ 狭缝刀口上如有纤维或灰尘,可用细软的小木条(如削尖的火柴棒)清理。

上述五条仅适用于处理一般光学仪器和元件。对全息光栅、用晶体材料加工成的透镜或棱镜等特殊元件,应采用特别的方法处理。

## 五、物理实验的过程

从教学法方面来说,学习方法大致可分为前后两大阶段:前期为启蒙阶段,学习以“模仿”为主,初步学会实验的工作方法,把基础打扎实;后期逐步转移到着重独立工作能力的培养方面。为此,本教材在编写上也有所侧重,前期写得比较详细,后期着重写明原理和实验方法的思路,而详细的实验步骤则要自行考虑。同时,还安排了一些设计性实验,以利于实验工作能力的培养。

实验与听课不同,它的特点是同学们在教师的指导下自己动手,独立地完成实验任务。通常,每个实验的学习都要经历三个阶段。

### 1. 实验的准备

实验前必须认真阅读教材,做好必要预习,才能保质、保量、按时完成实验。同时,预习也是培养阅读能力的学习环节。阅读时要以实验目的为中心,搞清楚实验原理(包括测

量公式)、操作要点、数据处理及其分析方法等;要反复思考实验原理、仪器装置及操作、数据处理等方面如何达到实验目的。做物理实验应始终在明确的理论指导下进行。预习时要尽量精心构思,写出简明的预习报告,内容包括:目的、原理摘要、关键步骤、数据记录表格等。

## 2. 实验的进行

内容包括仪器的安排与调整,观察实验现象与选择测试条件,读数与数据记录,计算与分析实验结果,以及误差估算等。

进入实验室,要遵守实验室规则。实验过程中对观察到的现象和测得数据要及时进行判断,判断它们是否正常与合理。实验过程中可能会出现故障,在教师的指导下,分析故障原因,学会排除故障的本领。实验完毕,做好仪器设备的整理工作。

## 3. 编写实验报告

编写实验报告,这是完成一个实验题目的最后程序,也是对实验进行全面总结分析的一个过程,必须予以充分的重视。通常实验报告分为三部分。

第一部分:实验目的和原理。

目的:说明本实验的目的。

原理:在理解的基础上,用简短的文字扼要地阐述实验原理,切忌整篇照抄,力求做到图文并茂,图示出原理图、电路图或者光路图。写出实验所用的主要公式,说明式中各物理量的意义和单位,以及公式适用条件(或实验必要条件)。

第二部分:实验记录。此部分在实验课上完成,包括下列内容:

(1)仪器:记录实验所用主要仪器的编号和规格。记录仪器编号是一个很好的工作习惯,便于以后必要时对实验进行复查。记录仪器规格可以使同学们逐步熟悉它,以培养选用仪器的能力。

(2)过程:实验内容和观察现象记录。

(3)数据:数据记录应做到整洁、清晰而有条理,便于计算与复核,达到省工、省时的目的。在标题栏内要注明单位。数据不得任意涂改。确定测错而无用的数据,可在旁边注明“作废”字样,不要任意删去。

第三部分:数据处理与计算。

此部分在实验后进行,包括数值进行运算。误差计算要预先写出误差公式。

结果:按较准确形式写出实验结果。在必要时,注明结果的实验条件。

实验讨论及作业:对实验结果进行分析讨论(对实验中出现的说明和讨论),以及实验心得或建议等,完成教师指定的作业题。

实验报告是实验工作的总结,是经过对实验操作和观察测量、数据分析以后的永久性的科学记录。编写实验报告有助于锻炼逻辑思维能力,把自己在实验中的思维活动变成有形的文字记录,发表自己对本次实验结果的评价和收获。实验报告可供他人借鉴,促进学术交流。因此,编写实验报告要求做到书写清晰、字迹端正、数据记录整洁、图表适合、文理通顺、内容简明扼要。

## 第二节 怎样学好、做好物理实验

普通物理实验是物理专业第一门独立的实验课程,对低年级的学生开设这门课程,不单是物理学的一门实验科学,重要的是物理实验本身有它一套实验知识、方法、习惯和技能,要掌握好这套实验知识、方法、习惯和技能,需要由浅入深,由简到繁加以培养和锻炼,也就是在低年级应打下良好的基础。

由于中学阶段对实验的训练比较薄弱,要学好这门课不但要花气力下工夫,而且还要有一定的学习方法,那么,怎样才能学好这门课程呢?

第一,要注意掌握实验中所采用的实验方法,特别是基本的测量方法。基本的测量方法既是经常用到的,也是复杂的测量方法的基础,学习时不但要弄懂它的道理,也要逐步熟悉和记牢。任何实验方法都有它的运用条件、优点和缺点,只有亲自做过实验才能对这些条件、优缺点有较深的印象。

第二,要有意识地培养良好的实验习惯。教材中不少地方叙述应如何记录原始数据和处理数据、注意事项和记录实验的环境条件(如温度、湿度)、安排实验仪器和装置、一般的操作习惯、乃至一些操作的姿势等。这些良好习惯是经历很多实验后的总结,它能保证实验安全、避免差错。但是就单个习惯而言,由于它很易明白,不难掌握,反而容易被学生忽视,认为无关紧要。实际上,要真正养成良好的习惯不但要经过多次实验,还要在每次实验中有意识地锻炼自己。

第三,要逐步学会分析实验,排除实验中出现的各种故障。实验最后一般总会有数据结果,这些数据是否正确靠什么去判断?数据的好坏又说明什么?实验结果是否正确?这些问题主要是要靠分析实验本身来判断,即必须分析实验方法是否正确,它带来多大误差,仪器带来多大的误差,实验环境会导致多大的影响,等等。由于普通物理实验的学习对象是大学低年级学生,他们的实践经验很少,也未掌握分析实验的方法。所以,实验时往往由实验室给出标准数据,或者安排一些已有十分确定的理论结果的实验题目,这都是为了帮助学生判断实验结果而设置的。但是学生千万不要误认为实验的目的是为了做出标准实验数据结果。往往有些学生,当实验数据和理论计算一致时,就会心满意足,简单地认为已经学好了这次实验;而一旦数据和计算差别较大,又会感到失望,抱怨仪器装置,甚至拼凑数据,这两种态度都是不可取的。实际上,任何理论公式都是一定的理论上的抽象和简化,而客观显示和实验所处的环境条件复杂得多,实验结果必然会带来和理论公式的差异,问题在于差异的大小是否合理。所以,不论数据好坏,主要的是要逐步学会分析实验,找出实验成功与失败的原因。

当出现数据不佳时,应该怎样对待呢?首先,要检查自己的操作和读数,这往往需要重复一下关键的操作和读数。最好请老师当场检查和指导。如果操作和读数都正确,那么毛病可能出现在仪器和装置上,仪器装置的小毛病和小故障,学生要力求自己动手解决,起码要留意观察老师是怎样动手解决的。即使是仪器装置失灵,也要观察老师是怎样去判断仪器的毛病,怎样修复仪器的。应该说,能否发现仪器装置故障以及修复仪器是实验能力强弱的一个重要表现,学生也要逐步有所提高。

第四,每次实验要掌握好重点。实验是一件实际的工作,除了重点的学习内容外,还会遇到很多零散的问题,做一些枝节的工作。这些工作固然需要做好,但要把它们完全搞清,短时间内是不可能的。教材中写上“学习重点”,是为了帮助学生注意在该次实验中把主要精力放在什么地方,以提高学习的效率。

本书中每个实验都包括有一定的测量内容,通过这些测量使学生体验实验方法和练习操作,并取得必要的实验数据。在完成规定的测量内容以后,如果还有富裕的时间,可以根据自己实验时的具体情况分析一下实验可能存在的问题,例如所用的某个仪器是否可靠?实验条件是否已得到满足?如何予以证实?或者提出对实验内容或仪器的一些小改进,等等。也可以针对问题做进一步实验。除了觉得自己的操作太生疏需要熟悉一下外,一般不必简单地重复。

实验有它自己的特点和规律,要学好实验不是一件容易的事情。希望学生在学习过程中能够不断提高对实验的兴趣,打好基础,使自己培养成为优秀的仪器操作能手。

### 第三节 误差理论及其应用

#### 一、物理量的测量和实验误差

对物理量进行测量,是物理实验极其重要的组成部分,对某物理量的大小进行测定,实际上就是将此物理量与规定作为标准单位的同类物理量或可借以导出的异类物理量进行比较。例如,物体的质量可以通过与规定用千克作为标准单位的标准砝码进行比较而测得;物体运动速度的测量则必须通过与两个不同的物理量,即长度和时间的标准单位相比较而获得。

现在,国际上规定了长度(米)(m)、质量(千克)(kg)、时间(秒)(s)、电流(安培)(A)、热力学温度(开尔文)(K)、发光强度(坎德拉)(cd)和物质的量(摩尔)(mol)共7个物理量的单位作为基本单位。其他物理量的单位则是由以上基本单位按一定的计算关系式导出的,因此称它们为导出单位。如以上提到的速度及以后经常遇到的力、电压、电阻等物理量的单位都是导出单位。

对一个被测物理量,除了用数值和单位来表征它外,还有一个很重要的表征它的参数,这便是对测量结果可靠性的定量估计。这个重要参数却往往容易为人们所忽视。设想,如果得到的一个测量结果的可靠性近乎为零,那么这种测量结果还有什么价值呢?因此,从表征被测量这个意义上来说,其结果可靠性的定量估计与其数值和单位一样,至少具有同等的重要意义,三者是缺一不可的。这里我们将主要讨论有关测量结果可靠性的定量估计及其表示方法。

按测量结果获得的手段来分,可将测量分为直接测量和间接测量;就测量条件是否相同来分,又有所谓等精度测量和不等精度测量之分。

**直接测得量:**是指一些物理量可以通过相应的测量仪器直接测得。凡由此获得的物理量统称为直接测得量。

**间接测得量:**是由一些直接测得量通过一定的数学关系式计算出来的量。

**等精度测量:**对某一物理量,在同样的实验条件下(同一实验者,同一实验仪器,同一

实验方法,同一实验环境等等)进行多次重复测量时,多次测得的结果又有所不同。对这类测量,没有任何的理由说某次测量一定比另一次更精确,这样,只能认为每次测量的精确程度是相同的。于是将这种具有同样精确程度的测量称为等精度测量。

不等精度测量:在多次重复测量时,只要上述诸实验条件中任何一个发生了变化,那么在这种情况下进行的测量便是不等精度测量。

严格地说,在实验中,保持实验中间完全相同的多次测量是极其困难的。但是,当某一实验条件的变化对测量结果影响不大,甚至可以忽略不计时,仍可视这种测量为等精度测量。为了简化问题的讨论,这里只限于研究等精度测量的数据处理问题。

测量过程中不可避免地总是存在着误差。这首先表现为,当同样的条件下对同一被测量重复进行测量时,得到的结果一般不会都相同;其次,因受所用仪器准确度及分辨率的限制,获得的结果也不会绝对准确;还有,在测量过程中,被测量往往要对测量仪器施加作用,方能获得测量结果,这便意味着测量过程本身会改变被测量原来的状态,等等。总之,这些都会使测量结果与被测量的真值或实际值之间存在着一定的差异。为此,我们定义测量结果  $X$  与真值  $A_0$  (或实际值) 的差为测得量的绝对误差  $\Delta$ , 有

$$\Delta = X - A_0 \quad (0-1)$$

其中  $X$  为被测量的实测值,  $A_0$  为被测量的真值。我们将凡是在一定的时间内,被测量值并不发生变化的真正大小称之为真值。鉴于以上所述的种种原因,一般说来,真值是很难被确切测定的。当然,用(0-1)式确定被测量的绝对误差也就成为不可能的了。不过,只有下列情况例外。

1. 理论真值。如平面三角形的三角之和总为  $180^\circ$ ; 直角三角形斜边的平方必等于两直角边的平方和等。

2. 由国际计量大会约定的值可视为近似真值(可把它们作为真值为已知的情況处理)。如前面介绍的基本物理量的单位标准,以及大会决议约定的基本物理量数值等,都可以视为近似真值。

3. 因为通常进行测量时,不可能将所使用的测量仪器逐一直接与国家的或国际的标准相校对,而是经过多级计量鉴定网逐级校对的,因此常用比被校仪器高一级的标准器的量值作为  $A_0$  近似真值(也称为实际值)。通常认为,若高一级标准器的误差为被校准仪器误差的  $\frac{1}{3} \sim \frac{1}{20}$ , 则可视此标准器的量值为被校仪器的近似真值。

4. 在理想条件(无系统误差和无限多次测量)下,多次测量的平均值,可作为近似真值,或称为最佳值。

为了表征测量结果的优劣,除了用绝对误差外,还需要引入相对误差的概念。例如,用螺旋测微计分别测定厚度为 2mm 和 2cm 的二平板,测量结果的绝对误差都为 0.005mm。显然,以绝对误差来评价以上两个测量结果,优劣程度是相同的。但是如果用绝对误差与测量值本身的比值来评价它们时,则会发现二者有明显的区别,即

$$\frac{0.005}{2} > \frac{0.005}{20}$$

不难判断,厚为 2cm 的测量结果要比厚为 2mm 的要好。为此,引入以上比值来表示测量

结果的误差,称为相对误差  $\delta$ ,表示为

$$\delta = \frac{\Delta}{A_0} \times 100\% \quad (0-2)$$

其中  $\Delta$  为测得值的绝对误差,  $A_0$  为其真值(或近似真值)。根据以上的讨论,只有对于具备能求绝对误差的以上三种条件,才可由(0-2)式求其相对误差。由(0-2)式,有时相对误差也称为百分比误差。

若从误差自身的特点和服从的规律来考虑,误差可分为系统误差、偶然误差和过失误差。下面介绍它们的特点。

### 1. 系统误差、准确度

系统误差是指实验系统(测量系统)在测量过程中和在取得其结果的过程中存在恒定的或按一定规律变化的误差。根据系统误差产生的原因,大致可分为:

(1)测量仪器误差。因受仪器本身准确度及分辨率限制而导致的误差。

(2)方法或理论误差。此乃因使用的实验方法或原理不完备而引起的误差。

(3)环境误差。由于外界环境如温度、湿度、电场、磁场和大气压强等因素的影响而造成的误差。

(4)人为误差。此乃由测量者的感观,特别是眼睛和其他器官不够完善而导致的习惯性误差,而且这种误差的产生和它对测量结果的影响往往因人而异。

(5)装置误差。这是由于测量设备安装得不尽合理,或线路布置得不够妥帖,或接线和仪器调整不当而产生的误差。

由于系统误差的存在直接影响着测量结果的准确性,减弱或消除这类误差才能使测量的结果更加接近真值。因此我们用“准确度”来描述测量结果系统误差的大小。所谓某一测量结果的准确度高,就是说该测量结果的系统误差小;反之,若某一测量结果的准确度高,其系统误差必然大。

### 2. 偶然误差、精确度

在测量过程中,即使是消除了一切可以消除的系统误差,或是对一切能够改正的系统进行了校正,也还会存在一些不确定的因素,如受人们感官灵敏度的限制,在使用指示仪表重复测量同一量时,很难做到每次的读数都完全一样;仪器分辨率的制约;在测量过程中周围环境会有起伏。此外,还有一些很难避免的偶然因素的干扰,这些都是有可能使重复测量的结果不尽相同。一般来说,彼此总会略有差异。对于上述因偶然因素引起的误差称为偶然误差。

偶然误差的存在使每次测量结果与真值相比总是有所偏离,偏大偏小都是可能的。但是随着测量次数的增多,便会发现它们服从一定的统计规律。对此类误差是可以用严格的数学理论和方法——概率论的理论和解决方法去解决的。

偶然误差反映的是一组测量结果的反复性和离散性,对此,我们用“精密度”来描述。如果某被测量经过多次重复测量,其值彼此间很接近,差异很小,说明此组测量结果重复性好,或者说测量的精密度很高;反之,若对同一量进行多次测量,所得数值极为分散,彼此相差很大,则说该组测量重复性差,也即精密度低。

### 3. 过失误差

这种误差纯属因实验者的粗心而在测量过程或计算过程中发生错误所致。所以,这类误差也称为粗差。显然,只要实验者细心测量,正确记录和处理数据,这种误差是完全可以避免的。

## 二、测量结果的一般表示、有效数字及其近似运算法则

### (一)测量结果的一般表示

原则上,测量结果一般可以表示为

$$\text{测量结果值} \pm \text{系统误差} \pm \text{偶然误差}$$

对上面表示的三部分简要说明如下。

#### 1. 测量结果值的表示

按单次及多次测量分,有以下两种不同表述方法:

(1)单次测量结果即用该次测得值来表示。

(2)多次测量结果则以多次测量结果的算术平均值来表示。等精度多次测量结果的最可信值就是多次测量结果的算术平均值。若有  $X_1, X_2, \dots, X_n$  表示该组测量的  $n$  次测得结果,则由上述结论知这组测量的最可信值可写成

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n} \quad (0-3)$$

这里  $\bar{X}$  为该组的算术平均值。可以证明当测量次数趋于无穷多,且在测量过程中不存在系统误差及过失误差时,由(0-3)式表示的算术平均值将趋于被测量的真值。因此,常以算术平均值作为真值未知的一组测量结果的近似值。为了说明各次测得值与算术平均值的偏离,并与(0-1)式给出的绝对误差相区别,引入绝对偏差(残差)的概念,以  $v_i$  表示,则有

$$v_i = X_i - \bar{X} \quad (0-4)$$

此处  $X_i$  为某次测量的测得值。同样也可以定义相对偏差  $\delta_i$ :

$$\delta_i = \frac{v_i}{\bar{X}} \quad (0-5)$$

上式若以百分数表示,便称其为百分比误差。

#### 2. 关于偶然误差的表述

偶然误差的表达式有多种,作为初次接触,这里只介绍其中一种最简单的表达式——以平均绝对偏差表示多次测量的偶然误差。对一组  $n$  次测量,定义平均绝对偏差为各次测量值的绝对偏差绝对值的平均值,以  $\eta$  表示,即

$$\eta = \frac{\sum_{i=1}^n |v_i|}{n} \quad (0-6)$$

误差理论指出,在测量次数  $n$  不是很小的情况下( $n \geq 15$ ),  $\eta$  相当于算术平均值的偶然误差的最大误差。需要指出的是,(0-6)式给出的平均绝对偏差并不是严格由概率论推出的结果,引入此式完全是为了初学者便于接受。在测量次数比较少时如  $n=5$ ,经过计算得知它表示结果在此范围内的可信程度为 80%。