

04-35/11

# 大基实

## 大学基础物理实验

朱世  
李德  
王和

朱世国  
李德炯 等 编著  
王和恩



● 四川大

学

四川大学出版社

1988年·成都

## 内容提要

本书分为力热、电磁和光学三部分，共十章。为了使学生了解和掌握基础物理实验的基本理论和基本方法，每个部分都有专门章节介绍误差知识和数据处理，常用仪器的原理、结构和性能参数，以及实验装置设计中的仪器选配等问题。实验编排方面，特别注意对学生综合应用已有知识解决实际问题的能力的培养和知识面的开拓。

全书近70个题目中，除理科学生必作的题目外，还有根据不同专业需要的选作题目。选题范围以训练学生动手能力的典型实验为主，同时也选用了反映现代物理实验技术的新题目。测量误差是本书的又一重点，贯穿于所有实验题目之中，部分实验的数据处理，还给出了微机计算程序。

本书可作为综合性大学和师范院校普通物理实验教材，也可供其他院校师生及自学青年参考。

## 大学基础物理实验

朱世国 李德炯 王和恩等 编著

责任编辑 樊程方

封面设计 蒋仲文

四川大学出版社出版

四川省郫县印刷厂印刷

四川省新华书店发行

\*

1988年10月第一版 开本：787×1092 1/16

1988年10月第一次印刷 印张：30.75

印数：1-5000册 字数：730千

ISBN7-5614-0143-4/O·30

定价：5.08元

## 编 者 的 话

《大学基础物理实验》一书分为力热、电磁和光学实验三个部分。在60多个实验题目中，大部分是综合性大学物理系一、二年级学生的必做实验题目，少部分是为对学生加强进一步训练而设置的选作题目。

在编写此书的过程中，我们力求作到以下几点：

1. 为了使学生系统了解和掌握基础物理实验的基本理论和基本方法，除了通过完成具体实验题目使学生获得有关实验技能的基本训练外，本书也强调了对学生在物理实验基础理论和方法的系统教学，使学生学得的知识更为系统、灵活。为此，在力热实验部分系统地介绍了有关误差估计和数据处理的基础知识；在电磁实验部分系统地论述了电磁测量的基本方法及常用电测仪器、仪表的结构，工作原理和性能。

2. 为了把测量误差的教学贯穿于整个实验课程，结合各具体实验题目的不同情况，本书就各种误差估算和数据处理方法在有关实验题目的数据处理中提出了相应的不同要求，以进一步加强学生的数据处理能力的训练。

3. 为了培养学生独立思考和独立工作的能力，有些实验题目在原理和方法简述之后，还附有一些预习思考题，以促使学生积极思考，充分调动学生在实验时的主观能动性。

4. 有些题目的数据处理引入了数值计算技术，这样既可深化这些题目的教学内容，也可让学生有机会应用他们已经学过的计算机语言课。

5. 以加强学生物理实验的基础训练为主要目的，在选排实验题目上，也同时注意到了学生知识面的开拓和对学生综合应用已学知识实际问题能力的培养。

本书可作综合性大学和师范院校物理专业学生基础物理实验课程的教材使用，也可作为上述两类院、校理科各系非物理专业中和工科院校中学习普通物理实验课的学生的参考书籍。

本书由四川大学物理系基础物理实验教研室部分同志编写，具体分工如下：

李德炯——第一章，第二章实验十三至十九；

唐兴年——第二章实验一至十二；

朱世国——第三至七章，第八章实验一至六、九、十二至十四、十六、十九、二十二、二十四、二十五；

张明高——第八章实验七、八、十、十一、十五、十七、十八、二十、二十一、二十三；

王和恩——第九章1~3节，第十章实验十四（I）、二十、二十一、二十三、二十五；

冯兴发——第九章第4节，第十章实验二、三、七、十、十四（II）、十六、二十二、二十四；

彭应聪——第十章实验一、六、九、十三、十五、十八；

蔡旭中——第十章实验四、五、八、十一、十二、十七、十九。

在本书编写过程中，林宏惠同志参与了第二部分编写方案的讨论，并为其中部分实验题目提供了资料，高绍波、张华戎同志参与全书的图表制作工作，在此，对他们的辛勤劳动表示衷心感谢。

由于编写时间仓促，编者水平有限，不妥之处，请读者批评指正。

编者

1988. 4 于成都

# 目 录

## 前 言

- 一、基础物理实验课的目的..... ( 1 )
- 二、基础物理实验课的规则和要求 ..... ( 1 )

## 第一部份 力、热实验

<b>第一章 实验误差与数据处理</b> .....	( 4 )
§ 1.1 测量与误差.....	( 4 )
§ 1.2 有效数字.....	( 9 )
§ 1.3 直接测量结果及其偶然误差的估计.....	(11)
§ 1.4 间接测量结果的误差估计.....	(17)
§ 1.5 有效数字的近似运算规则.....	(27)
§ 1.6 实验数据的列表法和图示法.....	(29)
§ 1.7 直线拟合.....	(33)
<b>第二章 力、热实验指导</b> .....	(43)
<b>实验一</b> 长度的测量.....	(43)
<b>实验二</b> 质量的测量.....	(51)
<b>实验三</b> 密度的测量.....	(60)
<b>实验四</b> 速度和加速度的测量.....	(72)
<b>实验五</b> 牛顿第二定律的验证.....	(78)
<b>实验六</b> 碰撞实验.....	(80)
<b>实验七</b> 机械能守恒定律的验证.....	(85)
<b>实验八</b> 重力加速度的测量.....	(86)
<b>实验九</b> 三线摆测转动惯量.....	(102)
<b>实验十</b> 杨氏模量的测定.....	(106)
<b>实验十一</b> 弦线振动.....	(110)
<b>实验十二</b> 声速的测量.....	(113)
<b>实验十三</b> 比热容的测定.....	(118)
<b>实验十四</b> 测定空气的比热容比 $\gamma = C_p / C_v$ .....	(125)
<b>实验十五</b> 相变潜热的测量.....	(129)
<b>实验十六</b> 用电热法测定热功当量.....	(134)
<b>实验十七</b> 金属内导热系数的测定.....	(137)
<b>实验十八</b> 液体表面张力系数的测定.....	(140)

实验十九 液体粘滞系数的测定	(146)
----------------	-------

## 第二部份 电磁学实验

<b>第三章 绪论</b>	(156)
§ 3.1 电磁测量的基本方法及仪器仪表的分类	(156)
§ 3.2 电磁测量中的基本单位	(157)
§ 3.3 基准的建立及其量值的传递	(158)
<b>第四章 直读式仪表</b>	(164)
§ 4.1 磁电式测量机构及工作原理	(164)
§ 4.2 测量线路——电流表, 电压表的构成	(166)
§ 4.3 磁电式灵敏电流计	(170)
§ 4.4 电动式仪表测量机构及其工作原理	(174)
§ 4.5 电动式仪表的测量线路	(176)
<b>第五章 直流电位差计</b>	(181)
§ 5.1 概述	(181)
§ 5.2 直流电位差计的原理线路	(182)
§ 5.3 电位差计的准确度级别和灵敏度	(184)
§ 5.4 电位差计补偿线路的典型结构	(189)
§ 5.5 电位差计在电测技术中的应用	(192)
<b>第六章 电桥仪器</b>	(194)
§ 6.1 直流电桥的工作原理和性质	(194)
§ 6.2 关于单臂电桥测量准确度和测量装置灵敏度的配合问题	(196)
§ 6.3 非平衡直流电桥	(200)
§ 6.4 双臂电桥的结构及工作原理	(204)
§ 6.5 电桥法测电阻时系统误差的来源及消除方法	(207)
§ 6.6 交流电桥的工作原理	(208)
§ 6.7 交流电桥的灵敏度	(212)
§ 6.8 交流电桥的平衡过程	(215)
§ 6.9 测量电感、电容的常用电桥	(217)
<b>第七章 磁测量</b>	(221)
§ 7.1 磁学测量中的标准量具	(221)
§ 7.2 冲击检流计	(223)
§ 7.3 各种测磁标准量具常数的检定方法	(229)
§ 7.4 磁测量的基本任务和常用测量方法	(232)
<b>第八章 电磁学实验指导</b>	(238)
<b>实验一</b> 电表的改装	(238)
<b>实验二</b> 电阻元件伏安特性的测定	(241)
<b>实验三</b> 磁电式灵敏电流计的研究	(245)
<b>实验四</b> 惠斯登电桥	(250)

实验五	金属电阻温度系数的测定	(254)
实验六	开尔文双臂电桥	(257)
实验七	用电位差计测量电源电动势及内阻	(256)
实验八	用直流电位差计校正伏特表和安培表	(263)
实验九	静电场的模拟造型	(266)
实验十	示波器的使用	(272)
实验十一	电子荷质比 ( $e/m$ ) 的测定	(279)
实验十二	R、L、C 串联电路谐振特性的研究	(284)
实验十三	R、L、C 并联电路的研究——交流电路功率因数的改进	(290)
实验十四	交流电桥	(293)
实验十五	圆线圈及亥姆霍兹线圈磁场的测量	(297)
实验十六	霍尔效应	(301)
实验十七	冲击检流计特性的研究	(305)
实验十八	放电冲击法测高电阻	(309)
实验十九	软磁材料磁滞回线的测定	(313)
实验二十	用示波法观测动态磁滞回线	(318)
实验二十一	弱磁物质磁化率的测定	(323)
实验二十二	磁致伸缩系数的测定	(327)
参考文献		(332)

## 第三部份 光学实验

第九章	光学实验的基础知识	(334)
§ 9.1	常用光学仪器	(334)
§ 9.2	常用光源	(337)
§ 9.3	光电探测器件	(343)
§ 9.4	光学实验仪器的使用和注意事项	(347)
第十章	光学实验指导	(349)
实验一	薄透镜焦距的测定	(349)
实验二	用焦距仪测量透镜的焦距和分辨率	(353)
实验三	观察薄透镜的象差	(358)
实验四	自组望远镜及显微镜	(361)
实验五	透镜组合	(366)
实验六	分光计调节及玻璃三棱镜折射率的测定	(368)
实验七	测定液体和固体的折射率	(373)
实验八	照相、印相和放大	(385)
实验九	用牛顿环测透镜的曲率半径	(392)
实验十	用双棱镜测波长	(396)
实验十一	迈克尔逊干涉仪	(399)
实验十二	薄膜厚度的测定	(406)
实验十三	平行光单缝和细丝的衍射	(411)

<b>实验十四</b>	衍射光栅.....	(414)
<b>实验十五</b>	氦氖激光束发散角的测定.....	(420)
<b>实验十六</b>	用单色仪测量介质膜片的透射曲线.....	(423)
<b>实验十七</b>	摄谱仪.....	(428)
<b>实验十八</b>	偏振光的观察与分析.....	(436)
<b>实验十九</b>	自动旋光仪.....	(439)
<b>实验二十</b>	偏振光的干涉.....	(443)
<b>实验二十一</b>	光电效应及普朗克常数的测定.....	(451)
<b>实验二十二</b>	光学纤维数值孔径的测定.....	(454)
<b>实验二十三</b>	全息照相.....	(459)
<b>实验二十四</b>	阿贝成象原理及空间滤波.....	(467)
<b>实验二十五</b>	激光散斑照相.....	(473)

## 附 录

<b>附录一</b>	基本物理常数表.....	(478)
<b>附录二</b>	各种物质的折射率.....	(478)
<b>附录三</b>	各种谱线波长.....	(479)
<b>附录四</b>	一些物质的旋光率.....	(483)



# 前 言

## 一、基础物理实验课的目的

物理学是自然科学中最重要的部门之一，在某种意义上，它可以看成是一门实验科学。

物理学的研究工作有实验的方法和理论的方法。实验的方法是一种由个别到一般的认识方法。实验物理工作者根据研究的目的，利用各种仪器、装置，在人为控制条件下重演所研究的物理现象，并集中精力对这些物理现象加以观察和测量，以便能较深入地揭露物理现象的本质。在大量的实验事实和测量结果中，找出某一物理现象与另一些物理现象之间的内在联系及其变化规律。可以说物理学中的基本物理概念的建立、基本物理规律的发现，都是以严格的科学实验为基础的，是概括了实验事实的结果。

物理学是用实验和实践这一直接的标准来检验自己的理论的。用概括实验事实的方法而建立起来的物理定律的正确性，是根据这一定律所推出的结论是否和实验结果一致而进行验证的。对于已经建立的物理定律、物理理论，如果与新的实验结果不相适应，则必须对这个定律原有的内容加以修正或发展。由此可见，物理实验虽然不是研究物理现象的唯一方法，但对物理理论的来源和判断是具有决定意义的。

物理学的原理，物理实验的方法及物理测量仪器，已被广泛地运用到几乎一切现代化科学研究、生产技术领域。反之，生产技术的进步，又促进物理实验方法和物理测量仪器的向前发展。因此我们要能更好地担负起建设社会主义的革命任务，为我国实现四个现代化贡献力量，就应该努力培养和训练实验工作能力，提高分析和解决实际问题的本领。

基础物理实验课的目的和任务是：

(1) 通过实验的观察、测量和分析，把理论和实际结合起来进一步深入认识物理现象，加深对物理概念和理论的理解。

(2) 对学生进行实验方法和实验技能的基本训练，使学生熟悉基本物理量常用的测量方法；熟悉常用仪器的基本原理和性能，掌握其使用方法（包括安装、调节、正确操作和读数）；培养学生手脑并用的能力。

(3) 使学生学会正确的记录实验，处理实验数据，分析判断实验结果，并能写出比较完备的实验报告。

(4) 培养学生严肃认真的工作作风，实事求是的科学态度和爱护国家财产，遵守纪律的优良品德。

## 二、基础物理实验课的规则和要求

物理实验课虽然是在教师指导下的学习环节，但在实验过程中，学生的学习活动有较大

的独立性。因此，学生在完成任何一个实验时，要求按预习、实验和报告三步进行。

### 1. 实验前必须预习

实验能否顺利进行，能否获得预期的结果，很大程度上取决于预习是否充分。因此在每次实验前，一定要按照实验室的规定安排，进行预习。预习时首先要对照实验设备，仔细阅读实验讲义，弄清楚本次实验的内容和原理，了解测量仪器、测量方法和测量步骤，写出预习报告。预习报告的内容包括：（1）简要地回答预习思考题；（2）画出实验数据的记录表格（表格力求做到简单明瞭、分类清楚、便于计算和复核）。

### 2. 课堂实验

实验是一种有目的的实践活动，因而严格遵守实验室的有关规定和要求是保证实验正常进行所不可少的。学生在进入实验室后应自觉遵守实验室规则，不能喧哗。实验观测前应首先清查所需用的仪器、用具。对所使用的仪器进行安装调整，使仪器满足其正常的工作条件（水平、铅直、正常的工作电压、温度、光照等），安装、调整仪器要耐心细致。安排仪器时要尽量做到便于观测、读数和记录。使用仪器时必须按操作规程进行，不是测量需要，不明确操作规程，千万不要胡乱动用仪器。观测时要精神集中，要尽量排除外界的干扰（也要注意不影响别人）。测量所获得的实验数据，除有明确的理由肯定有错误的的数据外，都应该及时的、正确的记录在实验表格内（包括某些可疑的数据）。如出现异常数据时，应增加测量次数。凡是与实验结果有关的物理现象、过程，也应简单的记录下来。在整个实验过程中，要注意同学之间的相互配合。测量结束后要尽快整理好数据，计算出结果，绘出必要的图线。此工作应尽可能在实验课上完成。并且根据数据整理过程中出现的问题，作必要的补充测量。因此，一般说来，只能在计算工作结束并将所得结果交指导教师审阅认可后，才能收理仪器，离开实验室。

### 3. 实验报告

写实验报告是对实验内容进行总结、深入理解的过程，这对培养同学分析总结问题的能力是十分必要的。报告要求独立完成，决不允许互抄；报告要求文理通顺，字迹清楚，图表美观。报告的内容包括：

- （1）实验题目
- （2）实验目的
- （3）实验仪器，用具（包括仪器的规格、性能和编号）
- （4）实验原理摘要（用自己的语言简要阐述）
- （5）实际实验步骤
- （6）数据记录及其处理（数据表格，主要计算步骤，误差估计，最后结果等）
- （7）问题讨论（实验中观察到的现象，特别是异常现象及其解释。讨论实验中存在的问题，改进实验的建议，回答实验的思考题）。

第二次实验课时，必须交上次实验的报告。

## **第一部份 力、热实验**

# 第一章 实验误差与数据处理

## §1.1 测量与误差

物理实验大致可以包括两方面的内容：定性地观察物理现象和定量地测量物理量的大小，进而用实验的方法研究各种物理规律。

所谓测量，就是用物理实验的方法，将被测量与作为单位的标准量相比较的认识过程。被测量是单位量的倍数，称为被测物理量的测量值。从获得测量结果的一般方法来分类，所有测量可以分为直接测量和间接测量两大类。

使被测物理量与作为标准的单位量直接比较，或者使用预先按标准量刻度的测量仪器进行测量，从而直接获得被测物理量的测量值（不需要通过物理公式计算），此种测量称为直接测量。例如，用游标卡尺测量长度；用水银温度计测量温度；用天平称物体的质量；用安培表测量电流等。

若某待测物理量 $N$ 系通过已知的物理公式与另外几个物理量 $x, y, z, \dots$ 相联系，因而对 $N$ 的测量可以先分别对 $x, y, z, \dots$ 进行直接测量，再将测得的数值代入已知的物理公式中进行计算，从而获得待测量 $N$ 的测量值，这种测量称为间接测量。例如密度的测量，密度 $\rho$ 是表示一定的均匀物体的特性的一个物理量，它和物体的质量 $m$ 成正比，而和物体的体积 $V$ 成反比，即

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

式中 $k$ 是一个数字系数， $k$ 的值由量度 $\rho, m$ 及 $V$ 的单位而定。若质量 $m$ 与体积 $V$ 的单位已经预先确定，我们就可以这样选取密度单位，使 $k=1$ 。在这种情形下，有

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

这样，对物体密度 $\rho$ 的测量，就可归结于对物体质量 $m$ 和物体体积 $V$ 的测量。再将 $m$ 与 $V$ 的测量值代入公式 $\rho = \frac{m}{V}$ 中，便可以算得间接测量的密度 $\rho$ 值。

间接测量的一般表示式为

$$N = f(x, y, z, \dots)$$

一般说，大多数测量都是间接测量，但是，随着科学技术的发展，很多原来只能间接测量的物理量，现在都可以直接测量了。例如电功率的测量，现在都是用功率表直接测量。

每一个物理量都是客观存在的，在一定时刻、一定位置或一定状态条件下，具有不依人的意志为转移的固定大小。这个客观大小称为该物理量的真值。测量某物理量的目的，就是

希望获得该物理量的真值。

当我们进行任何一种测量时，由于采用的物理实验方法和所使用的仪器不可能绝对完善，或者由于个人感官的缺陷或外界环境的影响等原因，我们不可能获得被测物理量的真值，只能获得与真值具有一定差值的近似测量值。测量值 $N$ 与真值 $N'$ 之间的差值，称为测量结果的误差 $\Delta N$ ，即

$$\Delta N = N - N' \quad (1.1-1)$$

测量结果误差的大小，反映了我们认识接近于客观真实的程度，反映了测量结果的不确定度（可靠程度）。由于测量误差问题与物理实验的各方面都有密切关系，测量所得的一切数据，毫无例外地都包含有一定量的误差。可以说，误差存在于一切测量之中，而且贯穿于测量过程的始终。

为了与其他形式的误差相区别， $\Delta N$ 又称为绝对误差。绝对误差是一个有名数，它是用与被测物理量相同的单位来表示的。

要比较对不同大小的物理量，或者要比较对同一物理量在不同条件下的测量工作的质量，仅用测量结果的绝对误差 $\Delta N$ 的数值来衡量是不够完善的，还应考虑到测量值本身的大小，因而引入测量结果的相对误差 $E$ 。相对误差就是绝对误差 $\Delta N$ 与真值 $N'$ （或测量值 $N$ ）之间的比值，即

$$E = \frac{\Delta N}{N'} \approx \frac{\Delta N}{N} \quad (1.1-2)$$

通常相对误差 $E$ 用百分数的形式表示：

$$E = \frac{\Delta N}{N'} \times 100\% \approx \frac{\Delta N}{N} \times 100\% \quad (1.1-3)$$

用百分数形式表示的相对误差，叫做百分误差或百分差。

相对误差是一个数，当测量工作质量相同时，我们将得到相同的相对误差。当测量结果的绝对误差相同时，相对误差的大小与被测量的大小有关。

在误差必然存在的情况下，测量的任务是：①设法将测量值中的误差减至最小；②求出在一定测量条件下被测物理量的最佳值；③估计此最佳值的可靠程度（接近真值的程度）。

为了便于估计误差对测量结果的影响并研究消除或限制误差的方法，根据测量过程中所产生的误差的性质，将测量误差分为系统误差和偶然误差两大类。

### （一）系统误差

在同一条件下多次测量同一物理量时，误差的值固定；在条件改变时，误差值按一定规律变化，这类误差称为系统误差。系统误差的来源大致有以下几个方面：

**第一，仪器误差。**这是由于测量仪器本身的缺点，或安装调节不当，或测量时外界条件改变所引起的。例如，仪器标尺分度不均匀；起始零点没有对准使螺旋测微计有零差；等臂天平的两臂实际不完全相等；天平砝码不准确；天平立柱未调节至严格的铅直位置；电表的转动部分偏心；载强电流的导线形成一个或多个回线（形成一匝或多匝）因而产生相应的磁

场对仪表的指示产生有害的影响；等等。

第二，理论（方法）误差。这是由于对测量方法研究不够，测量理论本身不够严密等引起的。例如，测量物体长度时，没有考虑到物体热胀冷缩；用高灵敏天平称衡物体质量时没有考虑到空气浮力的影响；测量的对象本身具有某种不稳定性（如测量某物体的密度而该物体含有杂质）；测量圆柱的直径而它的横截面不是严格的园形；单摆的周期公式  $T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$  成立的条件是很苛刻的，用单摆测重力加速度  $g$  时往往满足不了这些条件，因此必然引起测量结果的误差；等等。

第三，外界误差。在测量过程中，由于周期性的温度、气压、电磁场等外界环境按一定规律变化而引起的误差。

第四，个人误差。这是由于观测者个人生理或心理上的特点引起的误差。如用停表计时，某观测者常有滞后或超前的倾向；对标尺读数时，始终偏左或偏右等。

应该特别指出的是，个人误差不包括由于测量者粗心所造成的错误。例如，将6读为9；用米尺测量长度时，将102.50cm记录为125.00cm等。

总之，系统误差是由一些确定的因素引起的，它使测量结果具有固定的倾向。因此，在相同条件下，增加测量次数并不能发现和消除系统误差，必须从产生它的根源上，或用实验的方法，或引用其他更正确的测量方法消除它。一般地说，如果预先对所使用的仪器进行校准或选用适当精度的仪器，正确调整或严格保证仪器的使用条件，设法控制外界环境的影响；采取对称的实验方法，修正计算公式或引入修正值等适当的数据处理以及提高实验者的技能与实验素养等，原则上可以使系统误差减小到人们能够接受的程度。当然，在实际测量工作中，要预先防止、发现或消除系统误差，的确是一项非常复杂的工作，必须根据具体情况，具体分析才能解决。它需要我们具有丰富的实践经验和一定的物理知识并付出大量的艰苦细致的劳动。

## （二）偶然误差

在极力消除或改正了一切明显的系统误差之后，当我们在相同条件下对同一物理量进行多次测量时，所获得的测量结果仍会出现不同的数值。显然，这种差异是由于各次测量存在不同的误差所引起的，此类误差称为偶然误差。

偶然误差是由许多互不相关的独立因素引起的微小变化的综合作用的结果。在我们认为相同的条件下，在测量过程中，热状况的微小变化；空气的微扰；测量人员感觉器官的生理变化；电磁场的微变，以及仪器结构上某些不能控制的因素（如仪器各部分的变形、缝隙、摩擦及其精密程度的限制）或某些尚未发现的影响，这些干扰均带有偶发性。个别的计及这些影响是不可能的，既不可能预定也不可能控制。因此，对于任何一次测量，可能出现的偶然误差，其绝对值的大小及其正负，都是不可能预先确定的。然而，当测量次数足够多时，偶然误差就出现明显的统计规律性。实践和理论都证明，就其总体来说，偶然误差均服从正态分布（高斯分布）。服从高斯分布的偶然误差具有下面的一些特性：

- （1）单峰性：绝对值小的误差出现的概率比绝对值大的误差出现的概率大。
- （2）对称性：绝对值相等的正、负误差出现的概率相同。

(3) 有界性：在一定条件下，误差的绝对值不超过一定限度。

(4) 抵偿性：偶然误差的算术平均值随着测量次数的增加而越来越趋向于零。即

$$\lim_{k \rightarrow \infty} \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \Delta N_i = 0$$

偶然误差的统计特性告诉我们，增加测量次数可以减小偶然误差。这就是我们在实验工作中常常采取多次测量的依据。但是，测量次数不可能无限多，所以偶然误差不能完全消除。

系统误差的特征是其确定性，而偶然误差的特征是它的随机性，二者经常同时存在于一切科学实验之中，它们之间也是相互联系的，有时甚至难以严格区分。我们经常把一些不可定的系统误差看作是偶然误差，也常把一些可定的，但规律过于复杂的系统误差当作偶然误差来处理，从而使得部分误差被抵偿，以得到较准确的结果。例如，使用刻度不均匀的米尺测量某一长度时，常用米尺不同的位置，作为测量的起点，所获得的测量值是带有随机性的，其测量结果的误差，就可用处理偶然误差的方法来处理。

对于许多不精密的仪器的最大允许误差（如未经校准的0.5级或1.0级电表），测量结果的误差是由偶然误差与系统误差共同引起的。因此，测量结果的总的误差是系统误差与偶然误差的总和。而在精密测量中（如用校正后的0.5级或0.2级电表），系统误差与偶然误差是分别处理的。因此，对于每项具体工作，必须进行具体的误差分析，才能获得比较合理的误差估评。

### （三）测量的精密度、准确度和精确度

测量的精密度、准确度和精确度都是用来评价测量结果好坏的。但这三个词的涵义不同，使用时应该加以区别。

测量的精密度高，是指测量数据比较集中，多次测量时重复性好，因此偶然误差小，但系统误差不明确。

测量的准确度高，是指测量数据的平均值偏离真值较少，测量结果的系统误差较小，但数据分散情况，即偶然误差的大小不明确。

测量的精确度高，是指测量数据比较集中在真值附近，即测量的系统误差和偶然误差都比较小。精确度是对测量的偶然误差与系统误差的综合评定。

图1.1是以打靶时弹着点的情况为例，说明这三个词的意义，图1.1(a)表示射击的精密度高但准确度较差；图1.1(b)表示射击的准确度高但精密度较差；图1.1(c)表示精密度和准确度均好，即精确度高。

随着科学技术的发展，测量的精确度在不断地提高（减小误差）。但如前所述，任何测量都不可能避免误差，测量精确度的提高也不可能是无限制的。我们的目的是在承认有误差的前提下，设法将误差控制在实际需要的范围内，并且通过数学处理的方式评定误差的大小。

后面的讨论，是在假定系统误差已基本消除或已被限制在可以忽略的条件下，偶然误差的处理方法。

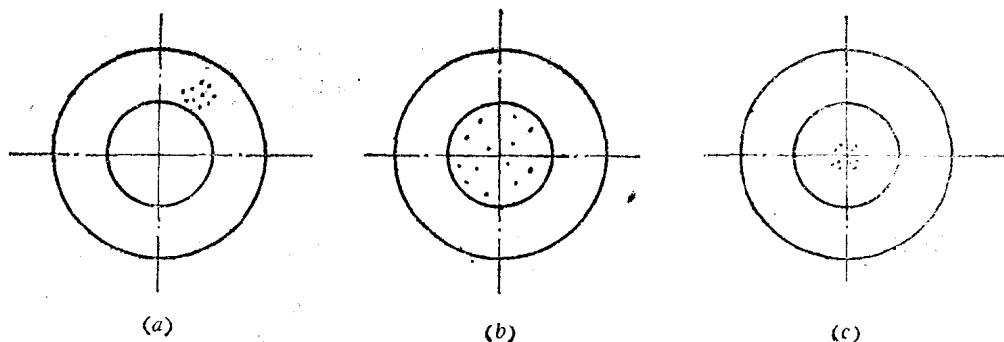


图1.1 精密性、准确度和精确度的意义

### 练习思考题

1. 用物理天平测量某物体的质量，多次读数均为45.51g，这是否说此称衡不存在误差？
2. 一个学生用迈克尔逊干涉仪测钠光灯发出的黄谱线的波长，多次测量后得黄谱线波长的平均值为5893Å，与此条谱线的标准波长值5893Å比较，数值相同，因此该学生认为此次测量结果的误差为零，对吗？
3. 用伏安法测量电阻器的电阻R时，如按图1.2(a)联接电路，则通过安培计A的电流不能全部通过电阻R，因此用  $R = \frac{V}{I}$  求出的R值偏小，即测量方法存在系统误差。那么，用图1.2(b)的联接法是否可以避免测量方法上的系统误差呢？

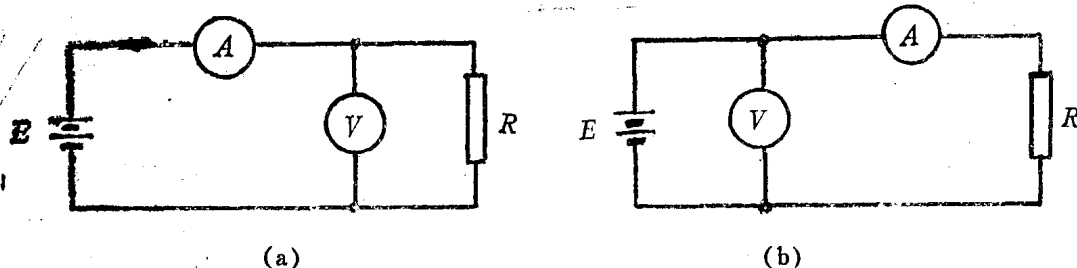


图1.2 伏安法测电阻的系统误差

4. 在20℃刻制的铁质米尺，用它在30℃时测一物体的长度为98.76cm，试求物体在30℃时的实际长度。（铁的线胀系数为  $1.2 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ）
5. 量角器量得晶体的面角为  $32^\circ 13' 25'' \pm 10''$ ，求其绝对误差与相对误差是多少？
6. 比较下列三个测量，哪一个测量工作质量好？
  - $l_1 = 54.98 \text{ cm}, \Delta l_1 = \pm 0.02 \text{ cm};$
  - $l_2 = 0.498 \text{ cm}, \Delta l_2 = \pm 0.002 \text{ cm};$
  - $l_3 = 0.098 \text{ cm}, \Delta l_3 = \pm 0.0002 \text{ cm}.$
7. 使用同一只停表测单摆的周期，第一次连续测量50个周期，其时间为96.4秒。第二次连续测量100个周期，其时间为192.8秒。按停表的误差可估计为0.2秒，您认为两次测量相比，哪一次测量结果好？



## §1.2 有效数字

从上节的叙述中,我们知道任何一个物理量的测量结果,都是一个近似的测量值。确定用多少个数字来正确记录实验的测量值,使实验记录在一定程度上反映出实际测量的过程,是实验数据处理中的一个重要问题。我们应该有一个明确的认识。

一般地说,用来记录实验结果的数字,除包括可靠无误的可靠数字外,还应该包括最后一位欠准的、有实际意义的可疑数字,即是用若干个可靠数字加上一个可疑数字组成的有效数字来表示。一个实验结果中有效数字个数的多少,与测量方法、实验环境、所使用仪器的最小分度、灵敏度以及实验者的分辨能力等有关。例如,用刻度准确的、最小分度值为毫米刻度的米尺测量某物体的长度,如果我们所使用的测量方法也是正确的(如图1.3所示),由于物体的末端止在12至13mm之间,读数时,我们在思想上应将米尺的最小分度(1mm)

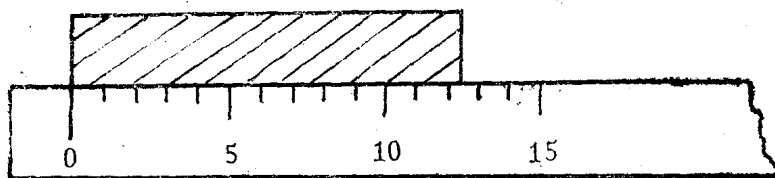


图1.3

再分为10等分,估读出毫米后第一位数字大约为4。最后获得 $l=12.4\text{mm}$ 。其中“1”和“2”是可靠无误的数字,叫可靠数字。“4”是一个估读的、欠准的数字,叫可疑数字。可疑数字具有一定的不确定性或误差,但它仍在一定程度上反映了客观实际,有参考价值。读出并记下它比舍去好。因此,在此次长度测量的结果中,共有三个有效数字。

对于有经验的实验工作者,末位可疑数字的估计可能仅相差这位数的一个单位( $\pm 0.1\text{mm}$ ),粗略估读也不会相差5个单位( $\pm 0.5\text{mm}$ ),显然,此位数以后的数根本不可能估读出来。因此,在本次长度测量中,我们可取 $0.5\text{mm}$ 作为最大绝对误差。

一般说来,测量结果中有效数字的可疑数字的位置应该由测量结果的绝对误差确定。例如,用精度为 $0.02\text{mm}$ (最小分度值 $0.02\text{mm}$ )的游标卡尺测量长度时,若取测量结果的绝对误差为其最小刻度值之半,即 $\Delta l = \frac{0.02}{2} = 0.01\text{mm}$ ,则以 $\text{mm}$ 为单位表示测量结果时,可疑数字的位置应在百分位上。又如,用单摆测量重力加速度,根据 $g = 4\pi^2 \frac{L}{T^2}$ ,算出 $g = 979.12\text{cm/s}^2$ ,另外又估算出其绝对误差 $\Delta g = 0.5\text{cm/s}^2$ ,则测量结果应表示为 $g = 979.1\text{cm/s}^2$ ,其可疑数字应在十分位上。

在使用数字显示仪器时,一般说来,其绝对误差为所示数字最末一位的一个单位,因此在数字显示仪器上所显示的数字,全部都是有效数字。

测量结果的有效数字个数越多,则测量结果的相对误差越小。例如,对某物体长度的测量,当使用米尺测量时, $l_1 = 12.4\text{mm}$ ,有三个有效数字,取绝对误差 $\Delta l_1 = 0.5\text{mm}$ ,则 $E_1 = \frac{0.5}{12.4} = 4\%$ 。当使用精度为 $0.1\text{mm}$ 的游标卡尺测量时,得 $l_2 = 12.40\text{mm}$ ,有四个有效