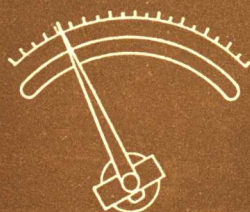


3

职工高等工业专科学校教材

物理实验

★ 张世良 李承恩 主编



高等教育出版社

04-53

59

职工高等工业专科学校教材

物 理 实 验

张世良 李承恩 主编

高等教育出版社

内 容 提 要

本书根据国家教育委员会颁发的《职工高等工业专科学校普通物理学教学大纲（草案）》的精神，按力、热、电、光的顺序编写了二十一个实验。各个实验均配有预习思考题和复习题。编写中考虑了职工大学的实际情况，每个实验明确提出了教学基本要求，实验原理清楚简明，实验步骤详尽清晰。实验步骤中的关键性叙述句均加有着重号以引起特别注意。此外，对大纲规定的8个基本实验，全部绘制有实验记录表格。书中还提供了有一定篇幅的参考性说明，以便对学生有所启发，也为教师备课提供一些方便。

鉴于目前职大物理实验室的现状，本书尽量介绍通用性仪器，力求实用、节约，特别强调充分利用普通仪器来丰富教学内容，重在培养和提高学生的实验素质和技能。

本书经国家教育委员会组织审订，可作为全国各类职工大学、业余大学普通物理实验课的教材，亦可供企业技术人员及广大自学者参考。

职工高等工业专科学校教材

物 理 实 验

张世良 李承恩 主编

高等教育出版社出版

新华书店北京发行所发行

北京印刷厂印装

开本850×1168 1/32 印张7.5 字数 187 000

1989年10月第1版 1989年10月第1次印刷

印数0001—4100

ISBN7-04-002442-X/O·823

定价 1.75 元

序

物理学是自然科学的一门基础学科，物理学的发展离不开实验。许多物理学的理论规律是直接从大量实验事实中总结、概括出来的。物理学的发展过程中有许多争论最终靠实验来判定是非。实验常常是纠正错误理论的依据并成为发展新理论的起点。任何理论的确立都要由实验来验证。物理学的进展通常是按实验——理论——实验——理论……的模式进行的。整个物理学的发展是理论与实验的结合和统一。因此，物理学是一门实验的科学。

除了在物理学发展中实验占有重要的地位以外，物理实验的方法、仪器、技术又被极其广泛地应用在各门自然科学、技术科学、应用科学、军事科学、信息科学、环境科学、社会科学、语言科学、艺术科学以至于日常生产和生活之中。例如，化学、生物、地学、气象、医学、农业科学等学科中的测量仪器，无所不在的计算机，电气仪表和家用电器，最新的航空、航天、航海技术，最尖端的武器系统，利用放射性同位素确定古文物的年代，艺术表演中的音响合成、激光背景等，都离不开物理实验的技术、手段和方法。

在本书里，我们是通过做各个具体实验来学习物理实验的。当然，我们在每个实验中要懂得测量原理，会使用仪器、按要求做完实验，把结果计算并表达出来，这些都是必要的，但也是最起码的。那么，通过这些物理实验我们还能学习些什么呢？

物理实验作为一门科学，有它自身的规律和特点。归纳起来，每一个实验都包括实验方法、实验条件、实验设计、实验操作、数据处理和结果分析这几个方面。本书所选择的实验包括实验内

容本身以及思考问题等，大体也是这样。

实验方法不同于具体实现对某个物理量进行测量的测量方法。实验方法包括：用实验检验理论的方法（如直接检验和间接检验的方法）；寻求物理量之间相互关系的方法（如回归分析、作图、量纲分析等方法）；研究物理规律的模拟方法和示踪方法；各种减小测量误差的方法（如相对测量、直接替代、交替测量、动态测量、定点测量、放大、累计等方法）等等。在这些实验方法里，又体现出许多好的实验思想。例如，把某些不能测量的物理量转换为可以测量的量，把测不准的物理量转换为可以测准的量，用测量物理量的改变量代替测量物理量本身，绕过一些不易测准的量、多测一些容易测准的量等等。

任何实验都必须在一定的条件下进行。实验条件是在实验原理的理论指导下，依据物理量本身在一定条件下的定义，通过采用某些实验方法、测量仪器或数据处理方法，最后体现在实验中采用的测量公式所要求的理论条件。实验条件可以通过仪器设计、调节实验装置、在实验操作过程中以及选择或人为创造一定的环境条件去满足。实验条件的满足程度取决于对实验结果精确度的要求。在实验中要注意去满足那些对实验结果可能有较大影响的主要条件。

实验设计要体现实验方法和实验思想并使之具体化。要寻求实验的最佳方案，包括找好实验地点，把握实验时机，制定最优化、最经济的实施方案，最恰当地选用或设计实验仪器装置。要提高测量的信噪比，要考虑实验理论公式的近似级及实验条件需要满足的程度，考虑实验安排等。

实验操作是完成一个实验的中心环节。在已经有了实验方案和仪器装置以后，能否达到实验设计的预期要求和目的甚至有超水平的发挥，就要看实验操作这个环节了。做实验时的总的指导思想是，要在现有条件下尽量提高实验的精确度，或者是尽量

以最低的代价、最高的效率达到预期的目的。要把实验的进行随时置于可控和预计之中，要有一个良好的实验习惯。例如，调整仪器装置要有目的、有步骤、有要求，不盲目、不乱动，也不必徒劳的过细。选择恰当的可变参数。安排好操作顺序、测量次数。恰当地满足实验条件。减少实验中的不确定因素。采集的数据要能反映客观实际情况。保证测的就是所预期的量而不是别的。随时观察实验中发生的现象。随时分析思考各种因素可能对实验结果引起的影响。随时判断数据的合理性。要自始至终处于积极的思维状态。

数据处理不仅仅是做完实验以后的事。在实验设计中，就要同时考虑实验方法和数据处理方法，以设计值或预测值作一次先期的处理。在实验操作过程中，要随时估算。数据处理首先决定于物理内容，按不同的物理模式处理同一组测量数据会有不同的结果。数据处理不应给测量结果添加附加的“误差”。要掌握有效数字的运算规则，也不费徒劳的功夫。

实验结果的误差分析实际上也贯穿于实验的全过程之中。实验中根据结果精确度的要求进行的方案确定、仪器设计、参量选择、实验安排、实验条件的满足程度、理论公式及数据处理中近似级的选择等等，无不包括误差分析的内容。要建立误差量级的观念。要注意抓住影响实验结果误差的主要因素，略去小量。要从物理内容上去分析误差而不仅仅从数学形式上去考虑问题。要注意积累各种学科、各种仪器、各种环境条件下以及自己本人误差的主要来源及量级等等。

以上只是概括地列举了极其丰富的物理实验内容的一部分。当然，我们不能要求同学通过做几个实验就有很多的体会，仅在大家开始学习实验之前提供一个参考，把它作为踏进物理实验这个广阔天地的大门的一块引路之石。

龚镇雄 1988年11月于北京大学物理系

前 言

1987年,高等教育出版社在国家教育委员会的指导下出版了适用于成人高等教育理论课教学的《物理学》教材,本书就是为配合实验课教学而编写的《物理实验》教材。

本书根据国家教委颁发的《职工高等工业专科学校普通物理教学大纲(草案)》的精神,按力、热、电、光的顺序,编写了21个实验(包括大纲要求的8个必做实验)。在编写过程中,注意突出实验思想,引导学生从物理角度去理解具体问题。考虑到职工大学学生的实际情况,每个实验都有一简短的引言,并明确提出教学基本要求,实验原理的阐述尽力做到简明扼要,实验步骤尽可能详尽清晰(实验步骤中的关键性叙述句,均加点以引起学生注意)。此外,对大纲规定的8个必做实验,全部绘有实验记录表格,以供学生学习参考。本书中带*号的内容供选择使用。

为了充分调动学生的主观能动性和培养学生独立工作的能力,本书还将习题分为预习思考题和复习题。预习题是为帮助学生在实验前对所要做的实验有明确的了解;复习题是作为学生巩固提高之用。复习题中带*号的习题,具有一定的深度或广度,供参考使用。书中还提供了一定篇幅的参考性说明,以便对学生有所启发,也为教师备课提供方便。

基于目前职大物理实验室的状况,本书尽量介绍通用性仪器,力求实用、节约,特别强调充分利用普通的仪器来丰富教学内容,重在培养和提高学生的实验素质和技能。

本书自始至终贯穿着测量误差和数据处理的教学内容,每个实验各侧重其中某一方面,使学生逐渐积累有关知识,不断提高误差分析能力。

考虑到职工大学的现状及学时的限制，近代物理实验部分此次暂不编入本书。这部分内容仍按大纲要求，作为参观性实验。各校可根据自己的具体情况，或组织学生参观近代物理实验室，或观看新科技电影、录像，或做一些定性的近代物理实验等。

本书由北京联合大学自动化工程学院张世良（绪论、实验一、二、三、四、五、六、十二、十六和附录）、陕西〇一二工学院李承恩（实验七、八、九、十、十一和十七）、马鞍山钢铁公司职工大学丛志新（实验十三和十五）、南京无线电厂职工大学严永良（实验十四和十八）、上海毛麻公司职工大学郁铭三（实验十九、二十和廿一）等人编写，最后由张世良统稿。洗锋同志为本书绘制了插图。龚镇雄（主审）、王兆虹（副主审）、曹运祥（副主审）、彭敏修、畅贞霞、李芬等同志承担了本书的审查工作。

本书在编写过程中曾得到很多单位和很多老师的多方支持和帮助，特别是1986年国家教委委托南京邮电学院组织召开的“全国第一届职大物理实验教学教材研讨会”，为本书的问世提供了资料和经验。1987年11月，实验教材评审会的全体成员对本书的编写提出许多宝贵意见。北京大学龚镇雄先生对本书的编写作了具体的指导；东南大学马文蔚先生对本书的编写给予了极大的关心与支持，编者对此均表示深切的谢意。

由于编者水平有限，本书疏漏之处在所难免，欢迎各位同仁批评指正。

编 者

1988年11月于北京

目 录

绪 论	1
§ 1 测量误差	3
§ 2 测量结果的有效数字及其运算	14
§ 3 处理实验数据的基本方法	18
实验一 长度的测量和密度的测定	32
实验二 用拉伸法测定金属丝的杨氏弹性模量	48
实验三 重力加速度的测定	57
I 用单摆测定重力加速度	57
II 用自由落体测定重力加速度	62
实验四 刚体转动惯量的测定	67
实验五 气垫导轨上的实验 (一)	
速度和加速度的测定	75
实验六 气垫导轨上的实验 (二)	
动量守恒和机械能守恒定律的研究	87
实验七 金属线膨胀系数的测定	96
实验八 固体和液体比热容的测定	101
I 用混合法测定金属的比热容	101
II 用电热法测液体的比热容	106
实验九 测定空气的比热容比	110
I 用声驻波法测定空气的比热容比	110
II 用贮气瓶测定空气的比热容比	114
实验十 液体粘滞系数的测定	117
实验十一 电学实验基本知识及用伏安法测电阻	123
实验十二 电表的改装和校准	137

实验十三	用惠斯通电桥测量电阻	144
实验十四	电位差计	153
实验十五	用稳恒电流场模拟静电场	163
实验十六	磁感应强度的测定	171
实验十七	学习使用示波器	181
实验十八	薄透镜焦距的测定	191
实验十九	利用牛顿环测定球面的曲率半径	202
实验二十	用衍射光栅测量光波波长	208
实验廿一	光的偏振现象的观察	218
附 表		224
参考书目		230

绪 论

物理实验在物理学的发展中起着非常重要的作用。无论是物理概念的建立,还是物理规律的发现,无不具有坚实的实验基础,并且只有通过科学实验的检验才能得到公认。

十六世纪意大利物理学家伽利略就已经非常重视将科学的实验方法引入到物理研究中,使物理学走上了真正的科学道路,其卓越的物理实验思想和方法很值得我们学习和研究。

在物理学史上的许多关键问题,最后都是通过实验得到解决的。例如,1820年奥斯特发现通电导线会引起附近小磁针偏转,它是电与磁之间相互联系的突破性实验。麦克斯韦的电磁理论预言电磁波存在,并指出光也是一种电磁波,但当时它未经实验证实,只能被看成是一种假说。后来经赫兹实验证实,麦克斯韦的电磁理论才获得普遍公认。又如杨氏双缝干涉实验,证实了光具有波动性。所有这些都表明,物理学中的每一个重大发展都和实验研究工作的推进分不开。

随着科学技术水平的提高,对实验工作者提出了更高的要求。为了培养具有分析问题和解决问题能力的科技工作者,必须加强实验教学。物理实验不仅是物理学本身赖以生存发展的基础,而且是其它自然科学和工程技术试验、测试的基础。基本物理实验技能训练也是各类工程技术人员提高本身素质不可缺少的基本内容。

物理实验课的教学目的和任务是:

1. 使学生在物理实验的基本知识、基本方法和实验技能等方面受到较系统而严格的训练,熟悉一些常用物理量具、仪器的性能和使用方法,学会一些物理量的测量原理和方法。

2. 培养学生观察和分析实验中出现的各类现象的能力。通

过实验，加深学生对一些物理规律的认识和理解，使学生能用所学理论和实验知识指导实验，分析和判断实验结果，不断提高理论联系实际和独立工作的能力。

3. 通过实验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、遵守纪律的优良品质，并逐步提高学生从事科学实验的素质。

实验课对学生的要求是：

1. 实验前，学生应认真预习，了解实验原理和方法，写出预习报告。

2. 实验开始时，应先检查和熟悉仪器，根据操作规程正确调试。要爱护仪器，防止损坏。对电磁学实验，必须经教师同意才能接通电源。

3. 实验中应合理操作，仔细观察，积极思考（如仪器是否正常、数据是否合理），及时记录环境条件、仪器编号、测试的原始数据、较明显的现象等。记录字迹要清楚，字体要规范，如需删去已记录的数据，可用铅笔划掉，不得涂改，同时注明原因。实验数据不能事后追记，更不可拼凑结果，也不能将数据随意记在草稿纸上，然后再誊写在表格内，这是不科学的坏习惯。

4. 实验完毕后，应及时整理实验数据，如果发现错、漏，应及时重测或补测，绝不允许抄袭他人数据。实验结束后要将仪器整理好，将数据交教师审阅签字，然后经教师同意方可离开实验室。

5. 独立完成实验报告。实验报告是学生实验成果的书面反映。报告应力求文字工整，语言简炼、通顺，数据齐全，图表规范，结果明确，解答问题认真。一份完整的实验报告一般应包括以下几点：

(1) 实验名称和日期；(2) 实验目的；(3) 实验仪器（包括名称、型号、规格、编号）；(4) 实验原理和方法（要用自己的语

言简要叙述，不要照抄书本)；(5)实验数据表格；(6)数据计算或作图；(7)实验结果；(8)问题讨论(实验现象的分析，改进实验的建议，实验后的体会，回答实验思考题等)。

这里提供的实验程序只是一种基本指导，学生应在实验中发挥自己的主观能动性，努力改进实验方法，不断增强自己的实验技能和独立工作能力。

§ 1 测量误差

一、物理实验与测量误差

物理实验是用实验方法去研究各种物理规律的，因此需要测定有关物理量的大小。每一个物理量都是客观存在的，在一定的条件下具有不依人的意志为转移的一定的数值。这个客观数值叫做该物理量的真值。由于实验理论的近似性、测量仪器分辨能力的局限性、实验中各种偶然因素等影响，测量结果不可能准确无误，也就是测量值(N)与真值(a)之间总存在一定的差异，我们称这种差异为测量误差* (ΔN)。定义

$$\text{测量误差} = |\text{测量值} - \text{真值}|$$

即
$$\Delta N = |N - a| \quad (0-1)$$

上式定义的误差反映的是测量值偏离真值的大小，因此又常称为绝对误差。

绝对误差与真值之比叫做相对误差。在测量值与真值相差不太大的情况下，可用绝对误差与测量值之比作为相对误差 E 。即

$$E = \frac{\Delta N}{a}$$

* 国际计量委员会建议以“不确定度”(uncertainty)取代“误差”(error)。遵照习惯，本教材仍沿用“误差”一词。

或

$$E = \frac{\Delta N}{N} \quad (0-2)$$

相对误差通常用百分数表示，所以又称百分误差。评价一个测量结果的优劣，不仅看绝对误差的大小，还需看相对误差的大小。测量误差是不可避免的，它存在于一切测量之中，而且贯穿整个测量过程的始终。因绝对误差的大小反映人们认识接近客观真值的程度，所以，在实验前的实验设计和论证中，实验进行过程的控制和监视中，实验后的数据处理和结果分析中，都应重视误差的减小或修正。不应把误差问题看成是一个单纯的计算问题，学生应重视测量误差的物理内容，明确误差分析对实验的指导意义。

二、系统误差和偶然误差

根据测量误差的性质和来源，一般将误差分为两类：系统误差和偶然误差（随机误差）。

1. 系统误差

使用同一种仪器，在同样的实验条件下，采用同一测量程序和方法多次测量同一物理量的数值，各次的测量值常常不相同，若其误差绝对值和符号保持恒定，测量条件改变时误差也按确定的规律变化，这类误差称为系统误差。它来源于：仪器本身的缺陷（仪器误差），比如电表刻度不准、天平不等臂；理论公式或测量方法的近似（理论误差或方法误差），如用伏安法测电阻时，电表内阻对结果的影响；环境变动（环境误差），如光照、温度、湿度的影响；测量者个人的习惯与偏向（个人误差），如采用停表计时方法，反应过快或过慢等。系统误差可采用对比的方法、理论分析的方法、分析数据的方法等去发现。系统误差的减小或消除是个比较复杂的问题，只有在很好地分析了整个实验所依据的原理和测量方法的每一步以及所使用的各种仪器之后，才能找出产生误差的各种原因，从而设法在测量结果中消除或减小系统误差

的影响。

2. 偶然误差

偶然误差又称随机误差.在同一条件下多次测量同一物理量,在极力消除或改正一切明显系统误差之后,测量结果仍会出现一些无规律的起伏.由于偶然的或不确定的因素造成测量误差值的大小和正负都带有随机性,这类误差称为偶然误差.偶然误差是由于实验中许多难以确定的因素如温度和湿度的随机起伏、空气不规则的流动、噪声以及人们感官分辨能力不同等引起的.从表面看,偶然误差似乎杂乱无章,纯属偶然,无法预计和控制,但是若测量次数足够多,结果中就会显示出明显的统计规律.到底遵守什么样的统计规律,要由所研究问题的性质来决定.在多数物理实验中,偶然误差将由许多微小、独立、不可分解的因素决定,偶然误差将服从正态分布(高斯分布),如图 0-1 所示.服从该分布的偶然误差具有下面一些特性:

(1) 单峰性:绝对值小的误差出现的几率比绝对值大的误差出现的几率大.

(2) 对称性:绝对值相等的正负误差出现的几率相同.

(3) 有界性:在一定测量条件下,误差的绝对值不超过一定限度.

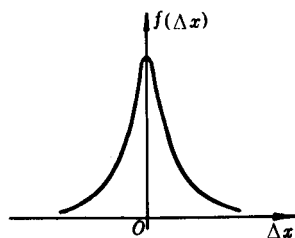


图 0-1

在一定条件下,增加测量次数可减小偶然误差,多次测量的算术平均值可作为直接测量的最佳值(近似值).在物理实验中,一般可取 5—10 次.

系统误差和偶然误差在来源、性质、处理方法上都是不相同的,但二者又是同时存在于一切科学实验中.它们之间是相互联系的,有时还很难严格区分.例如人们常把一些不可定或可定而规律过于复杂的系统误差当作偶然误差来处理;随着人们对误差

来源及变化规律认识的加深，有可能将过去认识不到而归于偶然误差的误差确定为系统误差。我们虽然对某一个测量结果的系统误差和偶然误差是分别讨论的，但最后还应将系统误差和偶然误差综合起来，并研究它们对测量结果的综合影响。

因实验者使用仪器的方法不正确、不合理或粗心大意记错数据而引起测量结果明显歪曲的现象，不应作为误差处理，这种错误应绝对避免。

三、几个概念

在评价测量结果时，常常使用以下几个概念，简单说明如下：

1. 精密度：指重复测量所得结果相互接近的程度。它反映偶然误差大小的程度。如测量精密度高，即指测量数据比较集中，偶然误差较小。

2. 准确度：指测量值与真值符合的程度。它反映系统误差大小的程度。如测量准确度高，即指测量数据的平均值偏离真值较少，系统误差较小。

3. 精确度：它反映系统误差与偶然误差的综合效果，有时也用“精度”泛指二者。如测量精确度高，即指测量数据比较集中在真值附近，系统误差与偶然误差均比较小。

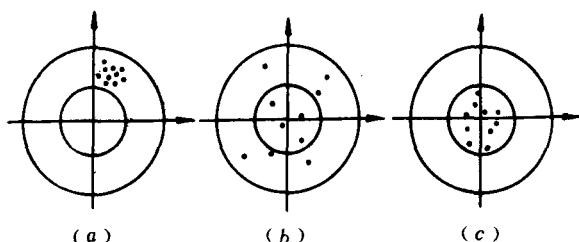


图 0-2

以上三者的意义和区别，可用“打靶”来形象说明。如图0-2图中三种情况下的着弹点都有一定的离散性，即子弹不是打在一

定的点上，而是分散在某一个区域。图 0-2 (a) 的弹着点比较集中，但都偏离靶心，表示精密度较高准确度较差；图 0-2(b) 的弹着点虽然比较分散，但平均值较接近中心，表示准确度较高而精密度较差；图 0-2 (c) 的弹着点密集在中心，表示精密度、准确度都较好，即精确度较高。

4. 灵敏度：它是指仪器指示器的最小变化与造成该变化所需待测量的变化之间的比值。它可用仪器本身来测定。灵敏度和精确度*是表征仪器或测量装置特性的。

四、偶然误差的估算与测量结果的表示

1. 直接测量量的测量误差及表示

如果待测量是由测量工具直接量度得到的，该量称为直接测量量。如长度、时间、质量等。

在不考虑其他因素，正确使用测量仪器时，仪器的示值与被测量的真值之间可能产生的测量误差称为仪器误差。有的仪器直接标出出厂公差（一般来说，仪器误差包含在公差之内）。有的给出仪器的准确度级别（如电表），由所用仪器的量程和级别或只用级别可算出出厂公差的大小。实验中，常用出厂公差代替仪器误差进行计算。下表是常用仪器量具的主要技术要求和出厂公差：

量具、仪器	量 程	分 度 值	出 厂 公 差
木 尺	30—50cm	1 mm	$\pm 1.0\text{mm}$
	60—100cm	1 mm	$\pm 1.5\text{mm}$
钢 板 尺	150mm	1 mm	$\pm 0.10\text{mm}$
	500mm	1 mm	$\pm 0.15\text{mm}$
	1000mm	1 mm	$\pm 0.20\text{mm}$
钢 卷 尺	1 m	1 mm	$\pm 0.8\text{mm}$
	2 m	1 mm	$\pm 1.2\text{mm}$

* 计量学常用精密度反映偶然误差，用正确度反应系统误差，准确度反映二者的综合效果。