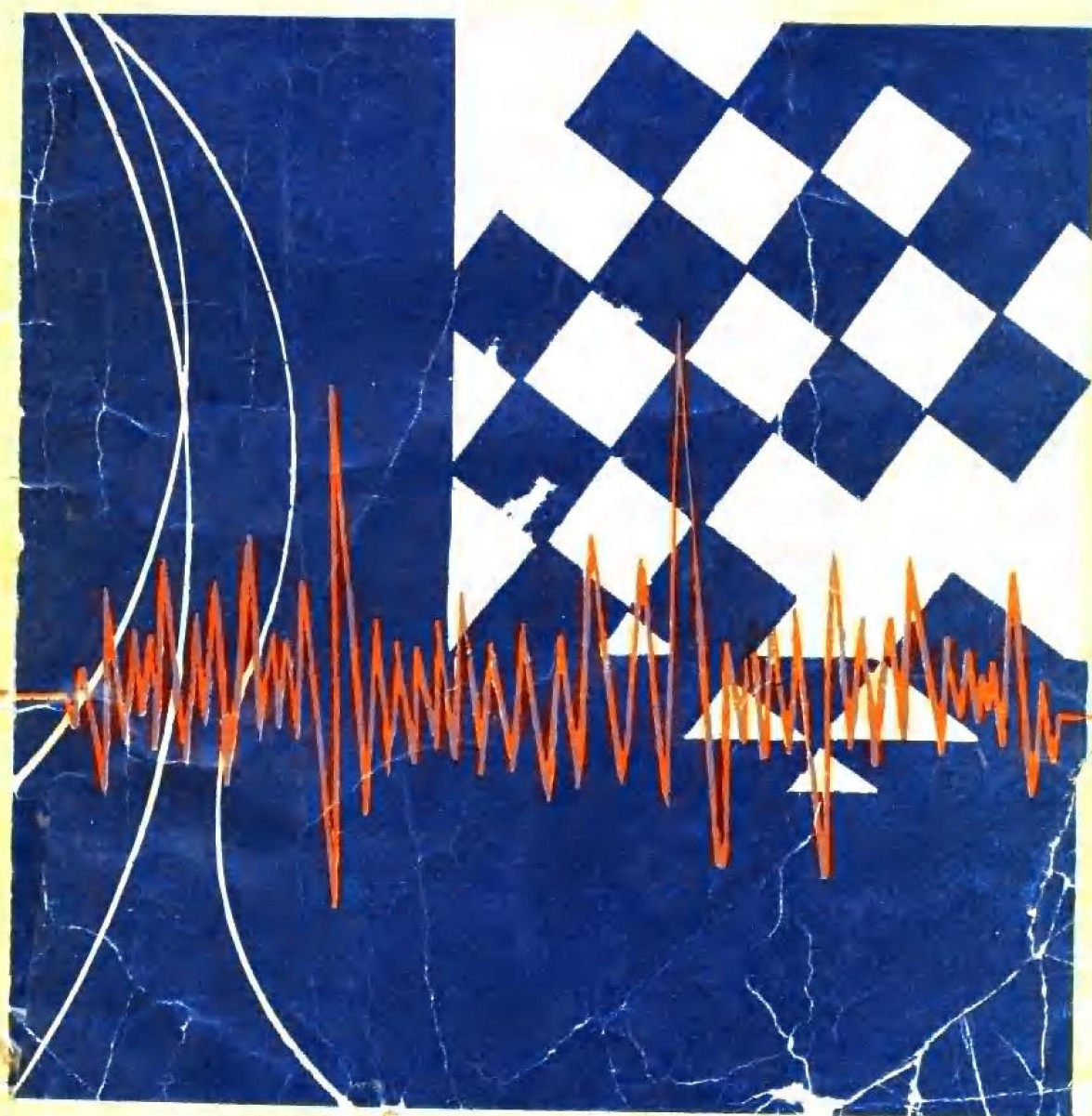


大学物理实验

张兆奎 缪连元 张立编著



华东师范大学出版社

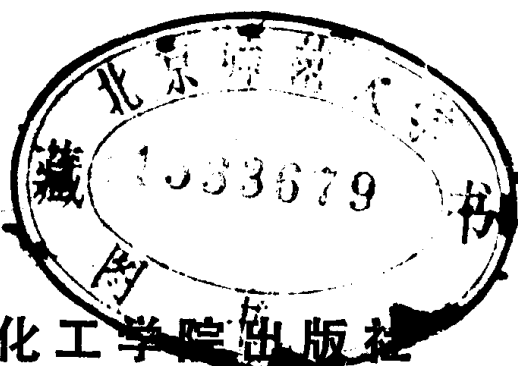
大学物理实验

张兆奎 缪连元 张 立 编著

周昌寿 黄德昭 主审

著：普通物理学实验教程 北师出版社

701158/03



华东化工学院出版社

前 言

本书是根据《高等工业学校物理实验课程教学基本要求》，结合上海地区部分高等工业学校几年来教学改革的经验编写而成的。

上海地区高等工业学校把物理实验课作为一门独立设置的必修课以来，已经历了十个寒暑。改革的实践使我们认识到，实验教学的根本目的是“培养学生科学实验能力，提高学生科学实验素质”。我们是以这一根本目的为主线来编写本教材的，以使 学生获得具有一定系统性的物理实验基本知识、基本方法和基本技能。

本书编写有以下几个特点：

(1) 把分散在各实验中的基本物理实验知识、基本物理实验方法、基本物理实验技能，进行了归纳和总结，并在阐述中注意系统性。全书共分为四章：第一章为物理实验基本知识，着重阐述与大学物理实验有关的数据处理知识；第二章为物理实验基本训练，比较系统地叙述了物理实验中的基本方法、基本调节技术与常用的基本仪器；第三章为物理实验基本技术，介绍了部分常用的检测技术；第四章为设计性实验，介绍了实验设计中的一些基本问题。在后三章中，每一章都配有一定数量的供训练用的实验课题。

(2) 在实验课题的选取上注意了典型性，改变了以“力、热、电、光”编排内容的方式。采取以训练的 性质、层次进行分类，按由浅入深、循序渐进的原则进行编排。

(3) 在各个实验训练课题的编写中，原理部分着重实验思路的引导，突出了从提出问题到解决问题的逻辑思维过程；实验要求注重能力培养；实验步骤由详到略，给学生以一定的思考。在每个实验课题后，都列有预习思考题和讨论题，前者引导学生实验前的预习，后者供学生实验后分析讨论和巩固提高。

(4) 考虑到目前中学实验的实际基础，以及各高等工业学校的实验条件不尽相同的情况，在实验训练课题的选取上留有一定余地，供各校选择。在涉及仪器介绍时，尽量突出仪器的基本原理与使用方法，在附录中则适当介绍这类仪器几种常用型号的外形特征，以增强适用性。

(5) 在物理量测量次数、数据处理与误差运算方面，本书对直接测量与间接测量分别给出了一张测量的工作流程图，以使 学生掌握一个基本的程序。

本书是在上海市高等教育局教学处领导下，上海市高等工业学校物理协作组组织下进行的。本书编写委员会由华东化工学院张兆奎、上海工业大学缪连元、上海交通大学张立、上海铁道学院张守义、上海大学工学院杨锦文五人组成。张兆奎、缪连元、张立任主编。参加本编写工作的还有：上海工程技术大学姚世亨、同济大学陆廷济、费定曜，上海科技大学王国，中国纺织大学王璧如、汪天泰，上海机械学院凤宝珊，上海交通大学钟洪荪、梁华翰、屈统明、华东化工学院顾懿、洪美霞，上海工业大学范培青、谢学枢、江伯陶，上海大学工学院马民勋，上海铁道学院楼晚珍。由华东化工学院周昌寿、黄德昭审阅了全书。

实验教学是一项集体的事业，本书的编写凝聚了上海地区各校实验技术人员的智慧与劳动成果。在本书编写期间还得到了全国兄弟院校许多同行的鼓励，谨致深切的谢意。

编写一本新型体系的教材,是一项艰苦而又复杂的任务,有赖于进行不断地改革实践和长期的研究探索,才能日臻完善。我们所做的工作只是一块引玉之砖,缺点和错误在所难免,敬请使用和阅读本书的教师、同学、技术人员和读者不吝指正,以便再版时修改订正。

编 者

目 录

绪 论	1
1 物理实验基本知识	5
1.1 测量及其误差	5
1.1.1 量、测量和单位	5
1.1.2 直接测量与间接测量	6
1.1.3 测量误差及其分类	6
1.2 系统误差和随机误差	6
1.2.1 系统误差	7
1.2.2 随机误差	8
1.3 测量结果的最佳值与随机误差的估算	8
1.3.1 随机误差的统计规律	8
1.3.2 测量结果的最佳值——算术平均值	9
1.3.3 随机误差的表示法	9
1.3.4 随机误差的估算	10
1.3.5 平均值的标准误差 $\sigma_{\bar{x}}$	11
1.4 仪器误差	12
1.4.1 仪器的最大误差 $\Delta_{\text{仪}}$	12
1.4.2 仪器的标准误差 $\sigma_{\text{仪}}$	13
1.5 有效数字及其运算	13
1.5.1 有效数字的概念	13
1.5.2 有效数字运算规则	15
1.6 测量结果的质量评价与直接测量结果的表述	17
1.6.1 测量结果的质量评价	17
1.6.2 直接测量结果的表述	17
1.6.3 直接测量的工作流程图	18
间接测量的误差与结果表述	20
1.7.1 误差的一般传递公式	20
1.7.2 标准误差的传递公式	21
1.7.3 几个简单关系的传递公式	21
1.7.4 间接测量结果的有效数字	23
1.7.5 间接测量的数据处理流程图	24
1.8 数据处理的基本方法	25

1.8.1	列表法	26
1.8.2	图示法和图解法	26
1.8.3	逐差法	31
1.8.4	最小二乘法和线性拟合	32
1.9	计算器在数据处理中的应用	34
1.9.1	标准误差的计算	34
1.9.2	最小二乘法一元线性拟合有关量的计算	35
	误差与有效数字练习题	37

2 物理实验基本训练 39

2.1	物理实验的基本测量方法	39
2.1.1	比较法	39
2.1.2	放大法	40
2.1.3	转换测量法	42
2.1.4	模拟法	43
2.2	物理实验的基本仪器	44
2.2.1	力学基本仪器	44
2.2.2	电学基本仪器	48
2.2.3	光学基本仪器	55
2.3	物理实验中的基本调整与操作技术	62
2.3.1	零位调整	62
2.3.2	水平、铅直调整	62
2.3.3	消除视差	63
2.3.4	等高共轴调整	64
2.3.5	逐次逼近法	64
2.3.6	先定性、后定量原则	65
2.3.7	电学实验的操作规程	65
2.3.8	光学实验的操作要点	66
2.4	微机在物理实验中的应用	

实验 1 基本测量 6

实习 1 长度与体积的测量 6

实习 2 物体密度的测量

实验 2 基本调节技术

实验 3 用单摆测量重力加速度

实验 4 微小长度变化的测量——光杠杆镜尺法 8

实习 1 金属的杨氏弹性模量的测量 8

实习 2 全反射率的测量 8

实验 5 低值电阻 6

实验 6	补偿原理和电位差计	99
实验 7	光路调整和透镜焦距测量	106
实验 8	分光计	112
实验 9	气垫技术	123
实习 1	速度、加速度和重力加速度的测量	123
实习 2	碰撞实验——验证动量守恒定律	129
实验10	液体表面张力系数的测量	136
实验11	转动惯量的测量	141
实习 1	三线摆	141
实习 2	扭摆	145
实验12	静电场测绘	148
实验13	灵敏电流计特性研究	154
实验14	电表改装与校正	158
3	物理实验基本技术	163
3.1	非电量电测技术	163
3.1.1	热电转换技术	163
3.1.2	力电转换技术	166
3.1.3	光电转换技术	167
3.2	测磁技术	169
3.2.1	冲击法	169
3.2.2	感应法	172
3.2.3	霍尔效应法	173
3.2.4	核磁共振法	175
3.3	电学测量动态显示技术	176
3.3.1	阴极射线示波器	176
3.3.2	电子电位差计	177
3.3.3	x-y函数记录仪	177
3.4	光学测量基本技术	177
3.4.1	干涉测量技术	177
3.4.2	衍射测量技术	178
3.4.3	偏振测量技术	178
3.5	照相和暗室技术	178
实验15	阴极射线示波器	178
实验16	冲击法测磁场	20
实习 1	互感系数的测量	20
实习 2	通电螺线管内磁场分布的测定	20
实验17	霍耳法测磁场	
实习 1	霍耳效应	

实习 2	霍耳法测量通电螺线管内部磁场	209
实验18	非电量电测(一)——温度电测法	210
实习 1	电阻温度计与不平衡电桥	211
实习 2	热电偶标定与测温	212
实验19	光的干涉——牛顿环	215
实验20	衍射光栅	218
实习 1	汞光谱波长测量	218
实习 2	氢原子光谱研究	220
实验21	光的偏振	222
实验22	光电效应	226
实验23	用波尔共振仪研究受迫振动	229
实验24	非电量电测(二)——声速测量	235
实验25	金属逸出电位的测定	240
实验26	迈克耳逊干涉仪	244
实验27	单缝衍射的光强分布	250
实验28	照相技术	254
实验29	小型棱镜摄谱仪的使用	262
实验30	全息照相	265
4	设计性实验	270
4.1	设计性实验的性质与任务	270
4.1.1	科学实验的全过程	270
4.1.2	设计性实验的特点	271
4.2	处理系统误差的一般知识	271
4.2.1	系统误差的分类	271
4.2.2	系统误差的处理	273
4.2.3	系统误差的传递和计算	276
4.3	实验方案的选择和实验仪器的配套	278
4.3.1	实验方法的选择	278
4.3.2	测量方法的选择	278
4.3.3	测量仪器的选择	280
4.3.4	测量条件的选择	281
4.3.5	数据处理方法与实验方案的选择	282
4.3.6	实验仪器的配套	283
实验31	误差分配和实验仪器的选择	285
实验32	重力加速度的研究	286
实验33	简谐振动的研究	287
实验34	变阻器的使用与电路控制	289
实验35	电位差计校准电表和测定电阻	293

实验36	非线性电阻特性研究.....	295
实验37	RC 串联电路暂态过程的研究.....	296
实验38	硅光电池特性的研究.....	299
实验39	光栅特性的研究.....	301
实验40	组装迈克耳逊干涉仪.....	302
总附录.....		305
1. 中华人民共和国法定计量单位		305
2. 一些常用的物理数据表		307

绪 论

1. 科学实验的地位和作用

认识来源于实践。科学实验是独立的实践活动之一。它是人们根据一定的研究目的,通过积极的构思,利用科学仪器、设备等物质手段,人为地控制或模拟自然现象,使自然过程或生产过程以比较纯粹的或典型的形式表现出来,从而在有利条件下,探索自然规律的一种研究方法。

科学实验的任务主要是:研究人类尚未认识或尚未充分认识的自然过程,发现未知的自然规律,创立新学说、新理论,研制、发明新材料、新方法、新工艺,为生产实践提供科学理论的依据,促进生产技术的进步和革命,提高人们改造自然的能力。近代自然科学的重大突破,一般不是直接来自生产实践,往往是通过科学实验这个环节研究的结果。

科学实验既是一切理论研究活动的基础,又离不开理论的指导。科学理论来源于科学实验,并受科学实验的检验。然而,实验研究课题的选择,实验的构思和设计,实验方法的确定,实验数据的处理,以及由实验结果中提出的科学假设,作出的科学结论等等,都始终受理论所支配。理论对实验的指导作用,还突出地表现在怎样对待科学探索中的“机遇”。有的科学工作者,由于具有较高的理论修养,较强的洞察力和良好的实事求是的作风,因而对“机遇”所提供的信息十分敏感,能及时作出正确的判断,选择那些看来有希望的现象进行深入的研究,这也是他们富有创造力的表现。相反,有的科学工作者对“机遇”视而不见,或者轻易放过,这是缺乏创造力的表现。

综上所述,科学实验是科学理论的源泉,是自然科学的根本,是工程技术的基础,同时科学理论对实验起着指导作用。因此,我们要处理好实验和理论的关系,重视科学的实验,重视进行科学实验训练的实验课的教学。

2. 物理实验的地位和作用

物理实验是科学实验的重要组成部分之一。物理实验在科学、技术的发展中有着独特的作用。历史上每次重大的技术革命都起源于物理学的发展。热力学、分子物理学的发展,使人类进入热机、蒸汽机时代;电磁学的发展使人类跨入电气化时代;原子物理学、量子力学的发展,促进了半导体、原子核、激光、电子计算技术的迅猛发展。然而物理学本质上是一门实验科学。三百多年前,伽利略和牛顿等学者,以科学实验方法研究自然规律,逐渐形成了一门物理科学。从此一切物理概念的确立,物理规律的发现,物理理论的建立都有赖于实验,并受实验的检验。

物理学史上,如果没有法拉第等科学工作者进行电磁学的实验研究,发现了电磁感应定律

等一系列实验规律,麦克斯韦就不可能建立麦克斯韦方程组。在确立了经典电磁学理论后,麦克斯韦预言了电磁波的存在,经过赫芝的实验研究,证实了电磁波的存在,从而使经典电磁学理论更为人们所信服。被称为“牛顿以来最伟大的发现之一”的能量量子化概念,就是在人们面对着大量黑体辐射实验事实,遇到了运用经典理论无法克服的困难时,普朗克紧紧抓住了1900年夏天德国物理学家康尔鲍姆和鲁木斯对热辐射光谱所作的新的精确测量结果,大胆地提出了能量子的假设,运用合理的数学方法,从理论上导出了符合实验结果的黑体辐射公式,为量子力学的发展开辟了道路。

物理实验在物理学自身发展中有着重要的作用,同时在推动各自然科学、工程技术的发展中也起着重要的作用。特别是近代各学科相互渗透,发展了许多交叉学科,物理实验的构思、物理实验的方法和技术与化学、生物学、天体学等学科相互结合已经取得、并必将取得更大的成果。

因此,作为培养高级工程技术人才的高等工业学校,不仅要使学生具备比较深广的理论知识,而且要使学生具有从事科学实验的较强能力。物理实验是对高等工业学校学生进行科学实验基本训练的一门独立的必修的基础课程,是学生在高等学校受到系统实验技能训练的开端。它在培养学生运用实验手段去发现、观察、分析和研究、解决问题的能力方面;在提高学生科学实验素质方面,都起着重要的作用。同时,它也将为学生今后的学习、工作奠定一个良好的实验基础。

3. 物理实验课的目的与任务

物理实验作为一门独立的基础课程,它有以下三方面的目的和任务。

(1) 通过对实验现象的观察分析和对物理量的测量,使学生进一步掌握物理实验的基本知识、基本方法和基本技能;并能运用物理学原理、物理实验方法研究物理现象和规律,加深对物理学原理的理解。

(2) 培养与提高学生从事科学实验的素质。包括:理论联系实际和实事求是的科学作风;严肃认真的工作态度;不怕困难,主动进取的探索精神;遵守操作规程,爱护公共财物的优良品德;以及在实验过程中同学间相互协作,共同探索的协同心理。

(3) 培养与提高学生科学实验的能力。包括:

自学能力——能够自行阅读实验教材或参考资料,正确理解实验内容,在实验前作好准备。

动手实践能力——能够借助教材和仪器说明书,正确调整和使用常用仪器。

思维判断能力——能够运用物理学理论,对实验现象进行初步的分析和判断。

表达书写能力——能够正确记录和处理实验数据,绘制图线,说明实验结果,撰写合格的实验报告。

简单的设计能力——能够根据课题要求,确定实验方法和条件,合理选择仪器,拟定具体的实验程序。

4. 物理实验课的基本环节

物理实验与其他科学实验一样,全过程包括以下几个环节:

①确立课题 ②收集资料;③确定方案;④选择与准备仪器;⑤排出具体的程序;⑥实验实践——严格操作,仔细观察,积极思维,科学地分析判断;⑦综合分析,思考,总结;⑧撰写论文报告。

作为对初学者的基本训练,本课程主要进行⑥→⑧的学习和训练;在第四章安排了设计性实验,将进行③→⑧的训练,使学生也能在实验方案、测量仪器的选择和配套、测量条件和实验程序的确定等方面得到初步的训练。

5. 怎样上好每一堂实验课

作为一门课程,实验课主要包含三个基本环节——实验前的准备(预习);实验的进行;实验后的报告。

(1) 实验前的准备(预习)

实验教材是实验指导。它对每个实验的目的要求,实验原理都作了明确的阐述。因此,在上实验课前都要认真阅读,必要时还要阅读一定的参考资料。对于实验中涉及的仪器,有的可能从未看到过,在预习时就要阅读教材中有关对仪器的介绍,包括构造原理,使用方法等,尽可能地去理解、去想象,以培养自己的想象力,必要时再到实验室去观察实物。

经过对教材的阅读和理解,在实验进行前你还应当思考一下:“做完这次实验我要达到什么目的?我要学会哪些实验技能和实验理论?在实验过程中如何去实现预定的目标?”,并在上课前写好预习报告。预习报告内容主要包括以下几个方面:①写出实验名称;②回答预习思考题;③列出有关测量的计算式、将要被验证的规律;④绘出电路图、光路图或设备示意图;⑤列出数据记录表格。

(2) 实验的进行

实验正式进行之前,首先要熟悉一下你将要使用的仪器、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,怎样做更为合理,不要急于动手。因为误解一步或调错一次,都可能使整个实验前功尽弃。

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”,要学习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。对实验过程中出现的故障要学会及时排除。

实验结束,要把测得的数据交给指导教师检验通过,对不合理的或错误的实验结果,经分析后还要补做或重做。离开实验室前要整理好使用过的仪器、做好清洁工作。

(3) 实验后报告的书写

写实验报告的目的是为了培养和训练学生以书面的形式总结工作或报告科学成果的能力。实验报告是在完成实验后所作的简明总结,也是实验成果的书面反映,所以在实验报告中应该有清晰的思路,齐全的数据、图表,而且要有科学的结论。

报告要求写在专用的实验报告纸上,书写时字迹要整洁,报告的内容一般应包括:实验名称,目的与要求,原理简述,实验方法,数据记录,数据处理与结果分析,以及讨论等九个部分。

下面分别对“报告”中各部分的写法提出一些要求:

关于“实验内容”和“目的要求”,一般应与教材中提法一致。

关于“原理简述”,应该是在对原理理解的基础上用自己的语句来阐述,要求做到简明扼要,图(原理图、电路图、光路图)文并茂,并列出的测量和计算所依据的公式。

关于“实验方法”,只要写出关键性的调整方法和测量技巧(不是具体操作步骤的叙述,而是个人体会和见解的阐述)。

关于“数据记录”,一般要求以列表的形式来反映完整而清晰的原始测量数据。

关于“数据处理与结果分析”,要求写出数据处理的主要过程、图线以及最后结果与误差分析。

关于“讨论”(包括回答复习思考题),一般讨论内容不受限制,可以是对观察到的实验现象进行分析、对结论和误差原因进行分析,也可以对实验方案及其改进意见进行讨论评述。

1 物理实验基本知识

实验是在理论思想指导下,利用科学仪器设备,人为地控制或模拟自然现象,使它以比较纯粹和典型的形式表现出来,然后再通过观察与测量去探索自然界客观规律的过程。由于自然条件错综复杂,变化多端,即使在实验室中已作了充分控制也难免不受影响。所以,观察与测量也不会永远是在理想化的条件下进行,测量也决不可能是绝对正确的。为此,实验除了要测得应有的数据外,还需要对测量结果的可靠性作出评价,对测量结果的误差范围作出合理的估计。否则,测量的数据就会毫无价值。

本章将介绍测量误差和数据处理的基本知识,在第四章中将进一步介绍误差分析在确定实验方案过程中的重要指导作用。

1.1 测量及其误差

1.1.1 量、测量和单位

任何现象和实体都以量来表征。量具有对现象和实体作定性区别或定量确定的属性。

物理实验是将自然界中物质的物理运动形态(机械运动、分子热运动、电磁运动、原子运动等)按人们的意愿在实验中再现;找出各物理量之间的关系,确定它们的数值大小,从中获取规律性认识,或验证理论,或发现规律,或作为实际应用的依据。要得到这种量化的认识,测量就是必不可少的。

测量是人类对自然界中的现象和实体取得数量观念的一种认识过程。为确定被测对象的测量值,首先要选定一个单位,然后用这个单位与被测对象进行比较,求出它对该单位的比值——倍数,这个数即为数值。显然数值的大小与所选用的单位有关,对同一对象测量时,选用单位越大,数值就越小,反之亦然。因此,在表示一个被测对象的测量值时就必须包含数值和单位两个部分。

目前,在物理学上各物理量的单位,都采用中华人民共和国法定计量单位,它是以国际单位制(SI)为基础的单位。国际单位制是在1971年第十四届国际计量大会上确定的,它是以米(长度)、千克(质量)、秒(时间)、安培(电流强度)、开尔文(热力学温度)、摩尔(物质的量)和坎德拉(发光强度)作为基本单位,称为国际单位制的基本单位;其它量(如力、能量、电压、磁感应强度等等)的单位均可由这些基本单位导出,称为国际单位制的导出单位。

1.1.2 直接测量与间接测量

测量可分为两大类：直接测量和间接测量。

直接测量是将待测量与预先标定好的仪器、量具进行比较，直接从仪器、量具上读出量值的大小。例如：用米尺测量长度；用天平称质量；用秒表测时间等。

间接测量则是待测量由若干直接测量的物理量经过一定函数关系运算后获得的。例如：欲测物体运动的平均速度 $\bar{v}$ ，可由直接测量物体运动的时间 Δt 和在时间 Δt 内通过的位移 Δs 并由平均速度的定义式： $\bar{v} = \Delta s / \Delta t$ 计算出 $\bar{v}$ 。

1.1.3 测量误差及其分类

被测物理量的大小(即真值)是客观存在的，然而在具体测量它时，要经过一定的方案设计，运用一定的实验方法，在一定的条件下，借助于仪器由实验人员去进行和完成的。尽管我们千方百计改进实验方案设计，提高仪器精度和测量人员水平。但是，仪器精度总有一个限度，实验方法不可能完美无缺，测量人员技术水平不可能无限提高，这就使测量所得的值与客观真值有一定差异。测量值 x 与真值 X 之差称为测量误差 Δ ，简称误差。

误差 = 测量值 - 真值，

即

$$\Delta = x - X. \quad (01-1)$$

误差自始至终存在于一切科学实验的过程之中。所以，作为科学实验的结果不仅要知道测量所得的结果，而且还要知道误差的范围。

测量永远不能得到真值，那么怎样的测量值是最接近于真值的最佳值呢？又如何来估算误差范围呢？这就有必要对误差进行研究和讨论，用误差分析的思想方法来指导实验的全过程。

误差分析的指导作用包含下列两个方面：

(1) 为了从测量中正确认识客观规律，就必须分析误差的原因和性质，正确地处理所测得的数据，尽量消除或减少误差或确定误差范围，以便能在一定条件下得到接近于真值的最佳结果，并作出精度评价。

(2) 在设计一项实验时，先对测量结果确定一个精度要求，然后用误差分析指导我们合理地选择测量方法、仪器和条件，以便能在最有利的条件下，获得恰到好处的预期结果。

1. 系统误差和随机误差

误差产生有多方面的原因，根据误差的性质和产生的原因，可将误差分为系统误差和随机误差两大类。

1.2.1 系统误差

它的特点是：在相同的条件下(指方法、仪器、环境、人员)对同一量进行多次测量时，误差的绝对值和符号(正、负)保持不变。测量条件改变时，误差亦按一定的规律变化。

它的来源有以下一些方面：

(1) 仪器的固有缺陷。例如：刻度不准；零点没有调准；仪器水平或铅直未调整；砝码未经校准等。

(2) 实验方法不完善或这种方法所依据的理论本身具有近似性。例如：称重量时未考虑空气浮力；采用伏安法测电阻时没有考虑电表内阻的影响等等。

(3) 环境的影响或没有按规定的条件使用仪器。例如：标准电池是以 20°C 时的电动势数值作为标称值的，若在 30°C 条件下使用时，不加以修正，就引入了系统误差。

(4) 实验者生理或心理特点，或缺乏经验引入的误差。例如：有的人习惯于侧坐斜视读数，就会使估读的数值偏大或偏小等。

系统误差的消除、减少或修正是属于技能问题。可以在实验前、实验中、实验后进行。例如：实验前对测量仪器进行校准，使方法完善，对人员进行专门训练等等；在实验中采取一定方法对系统误差加以补偿；实验后在结果处理中进行修正等等。

虽然系统误差的发现、消除、减少或修正是一个技能问题。但是，要找出其原因，寻求其规律决非轻而易举之事。这是因为：

(1) 实验条件一经确定，系统误差就获得了一个客观上的恒定值，在此条件下进行多次测量并不能发现该系统误差；

(2) 在一个具体的测量过程中，系统误差往往会和随机误差同时存在，这给分析是否存在系统误差带来了很大的困难。

能否识别和消除系统误差是与实验者的经验和实际知识有着密切关系。因此，对于初学实验者来说，应该从一开始就逐步地积累这方面的感性知识，在实验时要分析：采用这种实验方法(理论)、使用这套仪器、运用这种操作技术会不会对测量结果引入系统误差？

科学史上曾有过这样一个事例：

1909~1914 年间美国著名物理学家密立根以他巧妙设计的油滴实验，证实了电荷的不连续性，并精确地测得基本电荷的大小为：

$$e = (1.591 \pm 0.002) \times 10^{-19} \text{C}。$$

后来，由 x 射线衍射实验测得 e 值却与油滴实验值差了千分之几。通过查找原因，发现密立根实验中所用的空气粘滞系数数值偏小，以致引入了系统误差。在重新测量了空气的粘滞系数文后，使油滴实验测得的 e 值为：

$$e = (1.601 \pm 0.002) \times 10^{-19} \text{C}，$$

它与 x 射线衍射法测得的结果 $(1.6020 \pm 0.0002) \times 10^{-19} \text{C}$ ，十分吻合。

此例说明了实验条件一经确定，多次测量(密立根曾观测了几千个带电油滴)，发现不了系统误差，必须要用其它的方法(本例中改变了产生系统误差根源的条件)，才可能发现它；同时也说明了实验中应从各方面去考虑是否会引入系统误差，当忽略某一方面时，系统误差就可能从这一方面渗透到测量结果中来。

我们将在今后实验中，针对各实验具体情况对系统误差进行分析和讨论。在第四章中将作专门介绍。

1.2.2 随机误差

它的特点是随机性。当我们在竭力消除或减小一切明显的系统误差之后。在相同条件下，对同一量进行多次重复测量时，每次测量的误差时大时小，时正时负，既不可预测又无法控制。

随机误差的出现，从表面上看似乎是纯属偶然，但是人们经过长期的实践后发现，重复测量的次数很多时，偶然之中仍然会显示出一定的规律性。我们可以利用这种规律对实验结果作出随机误差的误差估算。

1.3 测量结果的最佳值与随机误差的估算

1.3.1 随机误差的统计规律

实践和理论都证明，大部分测量的随机误差服从统计规律。误差的分布如图 01-1 所示。

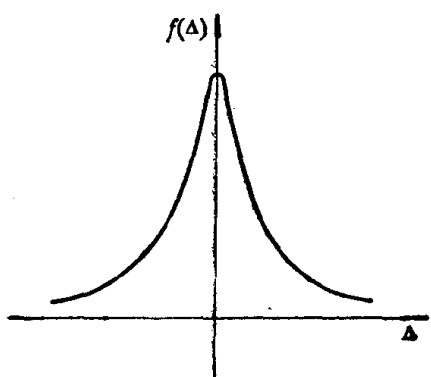


图 01-1

横坐标表示误差 $\Delta = x - X$ ，纵坐标为一个与误差出现的概率有关的概率密度函数 $f(\Delta)$ 。应用概率论的数学方法可导出：

$$f(\Delta) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{\Delta^2}{2\sigma^2}} \quad (01-2)$$

这种分布称为正态分布。式 01-2 中的特征量 σ 为：

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum \Delta_i^2}{n}} \quad (n \rightarrow \infty) \quad (01-3)$$

称为标准误差。

服从正态分布的随机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。在一定测量条件下，误差的绝对值不超过一定限度。
- (4) 抵偿性。随机误差的算术平均值随着测定次数的增加而越来越趋向于零，即：

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta_i = 0 \quad (01-4)$$

在测量不可避免地存在随机误差的情况下，使每次测量值各有差异，那么怎样的测量值是接近于真值的最佳值呢？