

21世纪应用型高等院校规划教材

大学物理 实验教程

◎ 缪兴中 主编

 科学出版社
www.sciencepress.com

内 容 简 介

本书系统地介绍了误差和数据处理的基本知识、物理实验的基本方法和技术,编排了基本实验、近代物理实验与综合物理实验、专题实验、设计性与研究性物理实验、虚拟物理实验,特别是创造性地开设了定性及半定量物理实验。本书强调实验的物理思想,用简洁、精炼的语言浓缩了相关实验的历史沿革、现实意义和应用前景,使同学们既能在实验室对基本的物理规律进行考察,同时又有机会吸取文化和科学的全息营养,受到从能力、素质到科学方法论的最全面的基本训练。本书力求从文化与历史的纵深,把握物理实验与社会发展和文明进步的脉搏,把对物理实验的认识提高到一个全新的高度。

本书可作为高等工业院校和普通高等院校物理实验课的教材和参考书,也可供物理教师、实验技术人员和相关科技工作者参考。

图书在版编目(CIP)数据

大学物理实验教程/缪兴中主编. —北京:科学出版社,2006
(21世纪应用型高等院校规划教材)

ISBN 7-03-018184-0

I. 大… II. 缪… 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(2006)第 141635 号

责任编辑:陈晓萍 庞海龙/责任校对:柏连海
责任印制:吕春珉/封面设计:耕者设计工作室

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

铭浩彩色印装有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2006 年 12 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2006 年 12 月第一次印刷 印张:25 1/2

印数:1—3 000 字数:593 000

定价:33.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈环伟〉)

销售部电话 010-62136131 编辑部电话 010-62138978-8003

《大学物理实验教程》编委会

主 编 缪兴中

副主编 吴明阳 薛运才 苏玉玲

编 委 沈 岩 蒋逢春 马晓春 常同钦

前 言

本着改革的理念和开放的思维,本书高度概括和全面升华了对物理实验的深层认识,挖掘了物理实验的科学内涵和文化魅力——物理实验不仅在物理学的发展中起了决定性作用,而且在科学思想、科学哲学、科学素质的凝练中,在促进两种文化——科学文化和人文文化的融合中,发挥着不可替代的独特作用;物理实验的卓越构思,不是一般意义上的技能和技巧,她是一种智慧、一种文化,是人类创造性思维的宝贵财富;物理实验对精神和物质的融合及凝练,物理实验的文化内涵和智慧光芒,将使学生终生受益……本着这一开放的理念,本书一改实验教材编写的传统思路,不仅把“力、热、电、光”的结构体系变为基础理论、基本方法、基本实验、近代物理实验与综合物理实验的新体系,还增加了专题实验,开设了设计性与研究性物理实验、虚拟物理实验,特别是创造性地介绍并引进了定性及半定量物理实验。在大学物理实验中开设定性及半定量实验,不仅让学生直观透明地看到物理学作为一门实验科学的生机勃勃的“原生态”面貌,而且能带来思想的解放、智力的活跃、追求科学的热情和兴趣。本书注重实验的物理思想和设计思路,用简洁、精炼的语言浓缩了相关实验的历史沿革、现实意义和应用前景,站在物理实验的前沿回望基础,并展望新的前沿。我们把目光投向历史和未来,不仅仅是为了寻求新的召唤,也是为了把握现实的尺度,力争使同学们既能在实验室对基本的物理规律进行考察,同时又有机会吸取文化和科学的全息营养,受到从能力、素质到科学方法论的最全面的基本训练。

参加本书编写的有缪兴中、吴明阳、薛运才、苏玉玲、沈岩、蒋逢春、马晓春、常同钦等。八名作者组成的编委会是一个谨严、统一的整体,大家统一思想、紧密合作、互相配合,表现了高度的团队精神和集体智慧。

本书不仅是我们多年教学经验的总结,更是教学经验的提炼和升华,从认识思维到内容结构都含蕴独到的创新性研究成果。

感谢艾宝勤、陈镇平、程令孝、李强、张运强、王如梅、王玲、师一华等同志对本书出版给予的支持和帮助,感谢参考文献作者的富有启发性的观点和优秀内容,在此谨向他们表示敬意!

谨向本书的读者和我的学生们表示深深的谢意!

物理学教授 缪兴中

2006年9月1日

于郑州轻工业学院

目 录

前言

第一章 绪论	1
1.1 物理实验与科学、文化和社会发展.....	1
1.2 物理实验课程的目的和任务	4
1.3 物理实验课程的基本环节	5
1.4 物理实验课的学习方法	7
第二章 误差分析与数据处理	11
2.1 测量误差.....	11
2.2 误差处理.....	14
2.3 有效数字及其运算.....	21
2.4 测量不确定度与测量结果的表示.....	24
2.5 不确定度分析与实验设计.....	30
2.6 数据处理基本方法.....	31
第三章 物理实验基本方法和技术	47
3.1 物理实验中常用的基本测量方法.....	47
3.2 物理实验中常用的基本仪器及其使用.....	54
3.3 物理实验基本测量技术.....	83
第四章 基本实验	96
4.1 转动惯量的测定.....	96
4.2 示波器的使用	103
4.3 分光计的调整与使用	113
4.4 用模拟法测绘静电场	119
4.5 用牛顿环测定透镜的曲率半径	124
4.6 用惠斯通电桥测电阻的温度系数	129
4.7 用静态法测量金属丝杨氏模量	134
4.8 电势差计的原理和使用	138
4.9 热膨胀系数的测量	144
4.10 灵敏电流计特性研究.....	148
第五章 近代物理实验与综合物理实验	156
5.1 霍尔效应及应用	156
5.2 热导率和对流传热系数的测量	163
5.3 迈克耳孙干涉仪的调整与使用	170
5.4 衍射光栅	179
5.5 声速的测量	182

5.6	用动态法测定金属棒的杨氏模量	189
5.7	铁磁材料磁滞回线的测绘	193
5.8	硅光电池特性的研究	199
5.9	光电效应测定普朗克常量	204
5.10	弗兰克-赫兹实验	209
5.11	数字信号光纤传输	215
5.12	密立根油滴实验	225
5.13	微波光学实验	229
5.14	核磁共振	238
第六章	专题实验	247
6.1	全息照相专题实验	247
6.2	传感器专题实验	259
6.3	偏振光专题实验	278
6.4	光谱分析专题实验	298
第七章	设计性与研究性物理实验	318
7.1	设计性与研究性物理实验基础知识	318
7.2	多用电表的设计与制作	322
7.3	光学介质折射率的测定	323
7.4	电子温度计的组装	331
7.5	细丝直径的测定	334
7.6	非线性电路振荡周期分岔及混沌现象	337
第八章	虚拟物理实验	340
8.1	虚拟物理实验基础知识	340
8.2	偏振光实验的计算机仿真	342
8.3	光电效应法测定普朗克常数	345
8.4	弗兰克-赫兹实验的计算机仿真	351
8.5	氢氫光谱拍摄实验的计算机仿真	355
8.6	密立根油滴实验的计算机仿真	359
第九章	定性及半定量物理实验	364
9.1	定性及半定量物理实验基础知识	364
9.2	静电感应现象探究	368
9.3	超导磁悬浮列车实验的定性分析	374
9.4	光学空间滤波与 θ 调制实验的半定量分析	379
附录		386
附录 1	中华人民共和国法定计量单位	386
附录 2	一些常用的基本物理常量	388
附录 3	希腊字母表及拉丁字母表	389
附录 4	诺贝尔物理学奖获奖者名单	390
主要参考文献		395

第一章 绪 论

1.1 物理实验与科学、文化和社会发展

物理学已经改变了昨天的世界，物理学正在改变今天的世界，物理学还将改变明天的世界，物理学是改变世界的科学。

然而，物理学首先是一门实验科学。没有物理实验，就没有物理学的昨天、今天和明天。

“实验是物理学发展的基础和决定性因素”已经成为人们的共识，成为论述物理实验的既传统又时尚的经典语言。然而，仅仅停留在这一层面的认识是不够的。物理实验不仅在物理学的发展中起了决定性作用，而且在科学思想、科学哲学、科学素质的凝练中，在促进两种文化——科学文化和人文文化的融合中，发挥着无可替代的独特作用。

在某些历史时期，震撼世界的物理实验，不仅对物理学乃至对自然科学和工程技术的发展起着划时代的作用，而且推动着社会文明的大步前进，甚至引发人类思想观念的全新改变。

让我们走进物理实验的科学殿堂，去感受它对世界的震撼，触摸它伸展到科学、文化和社会发展背景并不断为其输送营养的根根脉脉。

物理学概念的确立，物理学规律的发现，物理学理论的建立都有赖于实验，并受实验的检验。

开普勒三定律是依据布拉赫 (T. Brahe) 所积累的大量实验观测资料，又把哥白尼 (N. Copernicus) 的圆轨道修改为椭圆轨道而得到的。牛顿三定律是在伽利略 (G. Galilei)、开普勒 (J. Kepler)、胡克 (R. Hooke)、惠更斯 (C. Huygens) 等人的实验基础上总结出来的。能量守恒与转换定律也是大量实验的归纳，其中包括焦耳 (J. P. Joule) 所做的著名的热功当量实验。

电磁学中的一系列定律，如库仑定律、欧姆定律、毕奥-萨伐尔定律、法拉第电磁感应定律等都是实验的总结。赫兹 (H. R. Hertz) 通过电磁波实验使麦克斯韦 (J. C. Maxwell) 的电磁场理论得到了证实。迈克耳孙-莫雷实验动摇了 19 世纪占统治地位的以太假说，为爱因斯坦 (A. Einstein) 创立狭义相对论铺平了道路。

物理学中常常发生一些用不同的理论解释同一个问题的争论，实验往往会给某种理论以有力的支持，只有实验才能对某种理论的正确性作出终审判决。

在对光的本性认识的历史进程中，以牛顿 (I. Newton) 为代表的微粒说和以惠更斯为代表的波动说发生过长期的争论。光的成影和直线传播的事实支持了微粒说；光的独立传播的事实又给波动说提供了佐证。托马斯·杨 (T. Young) 的杨氏双缝干涉实验证明光是一种波动；列别捷夫 (П. Н. Лебедев) 的光压测定又利于光是微粒的学说。劳厄 (M. F. T. von Laue) 的 X 射线实验证实了 X 射线也是一种电磁波，具有

波动性的性质；光电效应又给光量子论以有力的支持。最后，在大量实验事实的基础上，以光的波粒二象性结束了这场旷日持久的争论。

物理实验是打破权威人物错误思想和错误理论统治的重要武器。

古希腊的亚里士多德（Aristoteles）曾经断言：力的持久作用是保持物体匀速运动的原因。这一曾经统治近 2000 多年的错误理论终于被伽利略斜面实验引出的惯性定律所否定。托里拆利（E. Torricelli）实验和托里拆利真空打碎了亚里士多德“自然害怕真空”的精神枷锁，带来了精神的解放、思想智力的活跃和追求科学的狂热。

物理实验往往成为发展理论的新起点。

1911 年，昂纳斯（H. K. Onnes）在研究低温下水银电阻变化的实验中发现了低温超导现象，由此开始了一个新的物理学分支——超导物理，并且兴起了全球的超导热。

1956 年，物理学家杨振宁、李政道在布鲁克海文实验室做研究工作时提出了在弱相互作用下空间对称的不成立。这一观点被实验物理学家吴健雄在华盛顿国家标准局低温实验室精心安排的 β 衰变实验证实后，才确定了新的科学理论——在弱相互作用下宇称不守恒定律，杨振宁、李政道也因此获得了 1957 年的诺贝尔物理学奖。

物理实验可以使假说成为科学的定论。

19 世纪 60 年代麦克斯韦系统地总结了库仑（C. A. de Coulomb）、安培（A. M. Ampere）和法拉第（M. Faraday）等人的电磁学的全部成果，并在此基础上提出了有旋电场和位移电流的假说，建立了著名的麦克斯韦方程组，从理论上阐明了电磁波以光速在空间传播，与光波有共同的特性。这是一个极其卓越的理论成果。但是，直到 1888 年赫兹接收到了由振荡源放电发出的电磁波，并且做了电磁波的反射、折射、衍射和偏振实验，测出电磁波的传播速度与光速同数量级，从实验上证实了麦克斯韦的全部假说之后，才使麦克斯韦的电磁理论开始被普遍接受。德国物理学家、量子力学奠基人之一、诺贝尔物理学奖获得者玻恩（M. Born）精辟地论述到：赫兹“重新论证”了麦克斯韦的电磁理论。千真万确，正是赫兹这些划时代的实验才使麦克斯韦创立的电磁方程——“出于上帝之手的符号”被公认为是从牛顿的引力场到爱因斯坦的相对论这段历史时期中最重要的理论成就。难怪爱因斯坦说：“一个美妙的实验，通常要比从我们头脑中提取的二十个公式更有价值”——这是科学伟人对物理实验的精彩描述。

实验可以纠正理论权威的某些不正确论断，导致新物理效应的发现。

1879 年美国物理学家霍尔（E. H. Hall）在其研究生的最后一年，因对麦克斯韦的《电磁学》中的一个论断——“在导线中流动的电荷本身完全不受磁铁接近或其他电流的影响”表示怀疑，而设计了一个被后人称之为霍尔效应的实验。霍尔效应实验不仅纠正了权威物理学家麦克斯韦教授的那个不正确的论断，而且为后来的半导体物理提供了重要的研究手段。

粒子物理学的研究必须在实验室里进行。

基本粒子中的一些粒子很少在自然界中出现，只能在实验室里产生。在为进行粒子物理实验而建造的各种各样的加速器中发现了数百种称为强子的粒子。随着实验能量的不断提高，人们又发现强子具有一定大小并有内部结构，在对大量强子性质分析的基础上，提出了强子结构的夸克模型。在深度非弹性散射实验中，人们用高能电子和中微

子作为“探针”，探测到了质子内部有“又小又硬”的东西，这表明夸克是有可能真实存在的。1974年 J/Ψ 粒子和1977年 γ 粒子的实验发现，是确立夸克理论的决定性事件。到1977年，实验上已经发现了五种夸克：上夸克、下夸克、奇异夸克、粲夸克和底夸克。美国费米国家实验室的CDF实验小组对质子-反质子对撞机两年的实验数据进行分析后，于1995年3月2日正式宣布了第六种夸克——顶夸克的存在，这是物理学和整个科学界的重大事件。

物理实验不仅促进了物理学自身的发展，而且在其他科学领域也有着重要的应用。

在生物学中，用物理实验的方法可以了解分子的传输、膜的结构以及在脑神经和肌肉中的信号过程。通过单跨膜分子通道对离子流进行的最新物理测量，为了解中心分子机理提供了重要的直接途径。

在环境地理学中，用风洞这种模拟物理实验，可以了解风沙运动的受力机制、沙粒的起动风速、风沙运动形式和沙流结构，为研究当今世界重大问题之一的沙漠化提供了重要方法。

在物理实验测量中发展起来的激光测高法、精密雷达探测、地球卫星和行星探测器上的遥感探测，以及断层X射线摄影术，为研究地球和海洋内部结构提供了重要手段。

材料科学的研究也离不开物理实验。粒子束技术、喷涂和分子束与表面的相互作用涉及原子物理实验技术。材料科学的分析实验，采取了包括卢瑟福散射、粒子束实验在内的原子物理学的分析实验方法。

物理实验在应用学科迅速推广应用的例子也是数不胜数的：激光打孔、切割，超声无损探伤，磁悬浮列车，静电植绒，物理勘探，地震预报，种子的辐射处理，花卉和蔬菜生长的温室技术，以及医学的CT扫描、核磁共振成像等比比皆是。物理实验方法已经渗透到生产技术乃至人类生活的一切领域。

物理实验不仅为物理学、一切自然科学和工程技术领域提供着硬件支持，而且向人类智慧提出了最深刻的挑战。

在现实世界里，绝对黑体这种物体是不存在的，即使看上去非常黑的物体，当它被看见时，已经有光反射到你的眼睛里了。怎样做出一个绝对黑体的实验模型？

通常，要用某种容器才能把物体贮存起来，但是，在受控热核反应的实验研究中，高温等离子体的温度高达上亿度，如果用容器装，世界上还找不到哪一种材料可以耐这样的高温。怎样才能把高温等离子体贮存起来？

相干光源需要振动方向、振动频率相同和维持相位差固定的严格条件。如何寻求满足这一条件的相干光源？

迈克耳孙-莫雷实验的光学底盘十分庞大，如何保持它的自由旋转和水平状态？

让我们探察一下这些实验的巧妙构思。

在一个空心球体上开一个小窗口，当光射入到这个窗口后，在球壳内经过反复的漫反射不断减弱，到达窗口时光强已经几近于零了。这个窗口并不是一个物体，但可以认为是一个近似的绝对黑体。于是，用不是物体的窗口解决了绝对黑体的实验模型。

在受控热核反应的研究中，用磁约束或惯性约束把上亿度的高温等离子体约束起来，成功地实现了不用容器的“贮存”。

在杨氏双缝实验和菲涅耳双棱镜实验中，利用分波阵面法很方便地解决了相干光源

的技术难题。

利用液体在重力作用下保持水平表面和水银有最大浮力的特性，迈克耳孙（A. A. Michelson）和莫雷（E. W. Morley）完成了一个最重大的否定性实验。

通过观察在重力和静电场力共同影响下漂浮在空气中的带电油滴的运动情况，精确地测出了基本电荷的数值，明确地、定量地验证了电荷的量子化这一突破性、革命性的崭新观念——当走进密立根油滴实验历时七年的漫长时空，观察小油滴宛如夜空中的明星那样缓缓运行，好像直接“看到”一个、二个电子“跑来”附在油滴上，或从油滴上“跑掉”的时候，谁也不能不为油滴实验的科学精神和智慧光芒所叹服。

物理实验的卓越构思，不是一般意义上的技能和技巧，它是一种智慧、一种文化，是人类创造性思维的宝贵财富。

自17世纪伽利略把实验方法与物理规律结合起来研究，使物理学走上真正科学的道路以来，物理学一直是自然科学的领头学科，推动着各学科的发展，诱发出许多交叉分支学科和技术领域。实验支撑着雄伟壮观的物理学大厦，促进了高新技术与产业的诞生和迅速发展，出现了步伐越来越快的新技术革命。

没有物理实验就没有物理学，就没有今天的人类文明。

物理学在今后的自身发展及推动自然科学、工程技术乃至人类文明的大步前进中，仍将不断经受着物理实验激动人心的检验和挑战。

今天，人类社会已经进入了知识经济的崭新时代，培养智能型、创造型的高素质人才是当今世界面临的共同课题。作为培养高级工程技术人才和研究人才的高等学校，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的能力。物理实验是学生进行科学实验基本训练的一门独立的必修基础课程，是学生进入大学后系统学习科学实验知识和技能的开端，也是后续实验课程的基础。它在学生深入观察现象，建立合理的实验模型，定量研究变化规律，分析、判断实验结果的可信度，激发学生的想象力、创造力，培养和提高学生开展科学研究工作的素质和能力方面，具有重要的奠基作用。

物理实验课程所覆盖的知识面和包含的信息量，以及能够使学生完成的基本训练内容，是其他课程的实验环节难以比拟的。

物理实验课程将为学生今后的学习、深造和工作奠定坚实的基础。

物理实验对精神和物质的融合及凝练，物理实验的哲学思维、文化内涵和智慧光芒，将使学生终生受益。

1.2 物理实验课程的目的和任务

作为一门独立的基础课程，大学物理实验具有独特的教学内容、教学方法、教学目的和课程任务。大学物理实验课程对学生能力和素质的培养不仅包含通常意义上的实验技能和操作技能，也包含实验过程中发现问题和解决问题的能力、综合分析能力、创造性思维能力、总结表达能力，还包含实验者的科学态度、求是精神、坚韧不拔的意志、追求真理的勇气及爱护实验仪器、节省实验材料的良好品德和科学学习习惯。这是其他课程不能完成，理论思维能力不能替代的。作为对学生系统地进行科学实验能力训练的开端

和基础，大学物理实验课程的目的和任务主要包括以下几个方面。

1. 学习和掌握物理实验的基本知识

通过对物理实验现象的观察、分析和对物理量的测量，学习和掌握物理实验的基本知识、基本方法、基本技术；懂得如何运用实验方法去研究物理现象和规律，加深对物理学原理的理解；熟悉常用实验仪器的基本原理、结构性能、使用方法；学习物理实验中独特而巧妙的思维方法。

2. 培养与提高学生的科学实验能力

1) 自学能力——能够自行阅读实验教材和参考资料，正确理解实验内容和实验原理，做好实验前的准备；对实验中出现的基本问题，能够通过查阅资料解决它。

2) 动手能力——能够借助实验教材或仪器说明书，正确地使用仪器和进行各种基本操作；培养一定的动手操作能力，能够解决实验中的一般性技术问题，排除实验中的简单故障；在一定的仪器设备条件下，通过努力，得出尽可能好的实验结果。

3) 观察能力——能够通过自身的感觉器官和它们的延伸物——实验仪器，捕捉实验过程所呈现的各种现象，发觉实验现象的各种特征，通过对现象的观察和比较，获得全面的、本质的实验信息。

4) 分析能力——能够运用物理学理论和实验原理对实验现象和实验结果进行初步分析、判断和解释；对各种因素可能引起的误差进行初步估计，对结果进行初步评价。

5) 表达能力——能够正确记录和处理实验数据，设计表格，绘制图线，描述实验现象，说明实验结果，撰写合格的实验报告。

6) 设计能力——对于简单问题，能够从研究对象或课题要求出发，查阅资料；依据基本原理，设计实验方法，确定实验参数，选配实验仪器，拟定实验程序，合理地、有效地安排测量方案和实验步骤。

3. 培养与提高学生的科学实验素质

在物理实验课的学习和训练中，要培养学生实事求是、理论联系实际的科学作风，严肃认真、一丝不苟、不怕困难、艰苦努力的科学态度，不断探索、大胆质疑、勇于创新的科学精神，以及遵守纪律、团结协作、节约资源、爱护公物的优良品德。

物理实验课程将通过以上密切相关的三个方面，使学生不仅能在实验室里对自然界的基本规律进行考察，同时又有机会吸取现代科学的最新营养，从而受到从实验能力、人文素质到科学方法论的最全面的基本训练。

1.3 物理实验课程的基本环节

物理实验是在教师和教材的指导下，由学生独立进行的课程。为达到物理实验课程的目的，完成物理实验课程的任务，必须充分发挥学生的主动精神，调动学生的学习积极性，自觉地、创造性地获得知识和技能。为此，应当高度重视物理实验课程具有的自身特殊性的三个基本教学环节，即课前预习、实验过程和实验报告。

1. 课前预习

课前预习是做好实验的关键。

一次实验课的时间有限，从熟悉仪器到测出数据，任务繁重。若课前不明确实验的目的、要求、原理和方法，不知道要测量哪些物理量、用什么仪器和怎样测量，不明确实验的思路和基本过程，不了解哪些地方是本次实验的重点应当特别注意，到上课时就不可能做好实验。可以肯定地说，实验能否顺利进行，能否获得预期的结果，在很大程度上取决于预习是否充分。因此，每次做实验之前必须预习，必须认真预习。

预习时主要阅读实验教材，必要时还需参考其他资料，以求基本掌握实验的整体概况，明确实验目的，看懂实验原理，了解实验内容，知道实验步骤。对实验中使用的仪器和装置，要阅读教材中有关仪器部分，了解使用方法和注意事项。当然，如果有条件的话，在实验室预习，才是最科学、最合理的方式。总之，要通过课前预习和思考，在脑海中形成一个初步的实验方案，并在此基础上写出预习报告。预习报告的内容包括实验名称、实验目的、实验原理、实验仪器、实验内容和步骤以及数据记录和处理表格。表格的设计要清晰、明确、简洁、规范。预习思考题有助于学生对实验原理的理解和对实验方法的掌握，在预习报告中也应对其做出回答。

2. 实验过程

实验过程是实验课的中心环节。

在动手实验之前，要先认识和清点所用仪器、装置和器具，了解其主要功能、量程、级别、操作方法和注意事项，不要急于测量。

实验时，要有目的、有计划地进行操作。

首先是布置、安装（或接线）和调试仪器。仪器的布局要合理，以方便操作和读数，特别要考虑到实验者和仪器的安全。合理选择仪器量程，严格遵守使用说明和操作规程，细致、耐心地把仪器调整到最佳工作状态。在电磁学实验中，接线完毕后，学生应自己作一次检查，再请指导教师复查，确认正确无误后才能接通电源。

调试完毕后即可开始实验。起初可作探索性试验操作，粗略地观察一下实验过程，若无异常现象，便可正式进行实验。如有异常现象，应立即切断电源，认真分析，仔细排查，并向指导教师反映。待找出原因，排除异常后再开始进行实验。

测量时要把原始数据整齐地记录在预习时已经准备好的数据处理表格中，注意数据的有效数字和单位。不要用铅笔记录，也不要先草记在另外的纸上再誊写在数据表格中，这样容易出错，况且这已经不再是第一手的“原始记录”了。如果记录的数据有错误，可用一斜线轻轻划掉，把正确的原始数据写在其旁，但不得涂改数据。要记住，原始数据是实验的最珍贵资料。

一份完整的实验原始记录，除数据之外，还应包括实验日期、环境条件（温度、湿度、气压、阴晴风雨等气象状况）、观察到的有关现象以及主要仪器的名称、型号、级别、量程、编号等。

在测量过程中要尽量保持实验条件不变，注意操作姿势，不要使仪器受到振动或移动。

实验完毕后，要暂时保持测试条件，请教师审阅实验记录，必要时也可能要重新

测量。

最后，经教师确认并签字后，再复原整理仪器，离开实验室。

3. 实验报告

实验报告是对所做实验的系统总结，是学生表达能力和信息交流能力的集中体现，也是交流实验成果的媒介。

实验报告应写在专用的实验报告上，要求层次分明、字迹清楚、文理通顺、简明扼要、图表规范、结论明确。书写实验报告是培养学生分析、总结问题的能力，提高文化素养和综合素质的一个重要方面。

实验报告的内容一般为以下几个方面。

1) 实验者姓名。

2) 实验的环境条件。

3) 实验名称。

4) 实验目的。

5) 实验原理。在对实验原理充分理解的基础上，用实验者自己的语言简要叙述有关的物理内容（包括电路图、光路图、原理和实验装置示意图），测量和计算所依据的主要公式，式中各量的物理含义、单位以及公式成立必须满足的实验条件等。

6) 实验仪器。主要型号、编号、量程、精度、最小分度值等。

7) 实验内容和步骤。除概括地写出实验进行的主要程序之外，还应包括实验中观察了哪些物理量，测量了哪些物理量，调节的要领和技巧，以便必要时重复或检验已经完成的实验。

8) 数据处理。在数据处理中要完成计算、作图、误差估算及结果表达等工作。要把原始数据按有效数字列成科学的表格，使阅读者能纵观全局，一目了然。在数据处理和误差运算中，应有主要过程，做到言之有据，结果可信。实验结果的表达，不仅要指出测量值的大小，还须按要求用误差范围的估算或不确定度来评定测量结果。

9) 分析讨论。分析讨论的内容相当广泛，可以深入探讨实验现象或进一步进行误差分析，也可以对实验本身的设计思想、实验仪器、实验方法的改进写出自己的心得体会或建设性意见，甚至于根本不同的意见。通过对分析讨论题的回答，还可以进一步深入理解物理实验的理论基础。分析讨论将为学生在更高层次上发挥自己的聪明才智提供一个自由思考的广阔空间。

以上只是提供了实验报告的一般格式。一份成功的实验报告，就是一篇科学论文的雏形，应力求用严谨的结构、流畅的文笔、清晰的思路和个性化的色彩，简洁地描述实验的内容、方法和步骤，表达实验所阐明的物理思想和概念，给出可信的明确结论。实验报告的撰写可以培养和提高学生的分析、表达和信息交流的能力。

实验报告可以和预习报告结合起来完成。

1.4 物理实验课的学习方法

物理实验课是学生接受系统科学实验训练的开端，是高等教育培养未来科学家、工

程师的一系列实践教育的基础和先导。它不仅要使学生掌握物理实验的基本知识，更重要的是通过从事科学实验的基本训练来培养学生的科学实验能力和科学实验素质。为达到物理实验课程的目的，完成物理实验课程的任务，学生必须主动地、积极地、创造性地去学习，有意识地培养和锻炼自己。实验课不同于理论课，也不同于实习课，它既有极强的理论性。更有极强的实践性。作为对学生系统地进行科学实验能力训练的开端，要学好这门课程，不但要花气力、下工夫，而且还要有一定的学习方法。

怎样才能真正上好物理实验课呢？

一、注意掌握基本的实验方法和测量技术

基本的实验方法和测量技术不仅会经常用到，而且也是复杂实验和测量的基础，学习时不仅要弄清它的原理、适用条件、操作要领，而且要通过实验实践，逐步熟悉和记牢，达到得心应手，运用自如。对分散在每一个实验中的具有普遍意义的实验方法、测量技术和巧妙构思，要联系起来、举一反三、反复研究、认真思考、不断总结，才能融会贯通，留下深刻印象。

二、注意培养观察能力

观察是实验者通过自身的感觉器官或它们的延伸物——仪器，来获得研究对象的信息的一种方法，是在相应的实验条件下为一定的实验任务而进行的有计划的知觉过程。

所有的物理规律都是通过相应的现象表现出来的，物理实验就是通过对这些现象的观察和测量来认识它们的。因此，实验的过程离不开观察，观察是实验的基础，通过观察所获得的信息越全面、越本质，对物理实验所呈现规律的认识就越正确、越深刻。观察是认识客观规律的重要途径。

培养学生的观察能力，就是要通过一定的训练，使学生学会从物理过程中去发觉和捕捉研究对象的各种特征，善于全面、深入、正确地认识这些特征。物理实验区别于一般性实用测量的显著特点是它的直观性，即它能较好地显示物理过程。学生既要观察过程的定性规律，又要观测过程中各物理量之间的定量关系，既要观测过程的精细结构，又要观察过程的总体趋向，必要时还要创造各种理想化条件，观测各种因素对实验过程的影响。

对实验过程的观察，不限于知觉，应当同积极的思维相结合。实验过程中会出现各种各样现象，要充分利用感官和大脑思维去观察、试探、估量物理现象是否预期出现，仪器的工作状态是否正常，仪器显示的物理信息是否受到干扰，观察到的物理现象是正常还是“反常”……，要抓住其中的关键，以实验原理为指导，以实验事实为依据，对观察到的现象进行分析、思考、保留或舍弃，必要时还须重复观察实验过程。

有效的观察还需有明确而具体的观察目的和关于所观察对象的预备知识。因此，要提高观察能力，必须做好预习，掌握实验过程，明确观察对象、观察目的和观察任务。

培养观察能力的训练还具体表现在合理地发挥观测仪器的功能，在仪器精度范围内充分有效地观察和捕捉物理现象，测准物理信息。

总之，学会观察、善于观察甚至多方位观察，是物理实验过程对学生能力培养的重要方面。只有在实验课的每个环节中养成观察的习惯，才能领悟观察的方法，逐步提高

实验观察能力。

三、注意提高科学分析的能力

分析是科学思维的基本过程和方法，能使在实验过程中由观察得到的现象和信息所反映的本质及其变化规律得以显现和总结。分析能力是实验者最重要、最基本的素质。

在物理实验中可以通过对实验过程中的正常和“反常”现象的分析、测试故障的分析、仪器的分析、测试环境影响的分析、误差分析和测量结果的分析等，来培养学生的分析和综合能力。

例如，实验最后一般都要获取数据结果，数据是否正确靠什么去判断，数据的好坏说明什么问题，实验结果是否可信，这些问题要靠思考分析才能作出综合判断，即必须分析实验方法是否正确，实验条件是否满足，仪器的精度和使用是否配合得当，实验环境有多大影响以及上述各种因素可能带来的误差大小等。

实际上，任何理论都是在一定基础上的抽象或简化，而客观现实和实验所处的环境条件要复杂得多，实验结果有可能产生和理论公式的差异。问题在于差异的大小是否合理，应通过分析找出其中的原因。千万不可认为，实验就是按教材所列举步骤的机械操作，其目的只是为了做出标准的实验数据。往往有些学生，当实验数据和理论计算一致时，就心满意足，简单地认为自己已经学好了这个实验；一旦实验数据和理论计算差别较大时，又感到失望，抱怨仪器装置，甚至拼凑数据。这两种缺乏科学分析的态度和表现都是不对的。

在科学实验的历史上曾经出现过这种情况，即实验结果与原有的理论或习惯认识不一致，而通过分析和综合肯定了实验结果在测量误差范围之外，这时，实验者可能已经打开了通向科学发现的一扇大门。例如，1894年英国物理学家瑞利（T. B. Rayleigh）测定空气中氮气（ N_2 ）的密度为 $\rho=1.2565\text{g/l}$ ，而他从分解氨气（ NH_3 ）得到的氮气的密度为 $\rho=1.2507\text{g/l}$ ，两者的测量值在第4位有效数字上发生了差异。经过实验分析，他肯定两者的差异超出了实验的测量误差范围（他当时认为空气中除了氧气以外都是氮气），后来进一步的研究，导致了空气中氩气的发现。现代量子电动力学的建立过程也有这样的例子：在进行电子磁矩的测量时，发现测量结果与狄拉克方程给出的理论值差千分之一，通过综合分析，确信了这不是测量误差，于是导致了量子电动力学的建立。

由此可见，科学分析在物理实验过程中的极端重要性。简单的实验结果，哪怕与理论值十分接近，甚至于完全相符，也不能替代对实验的科学分析。当然，在我们物理实验的课堂上，上述科学发现的几率也许非常之小，但是，在实验课程中对科学分析能力的培养将使学生终生受益。

四、注意掌握每次实验的重点

实验是在理论指导下手脑并用的一项实际工作。从某种意义上来说，实验课所面临的问题要比理论课更加丰富多彩、复杂而具体，除了需要重点学习的内容之外，总会遇到许多零碎的问题，甚至要去完成一些枝节的工作。这些工作固然也需要学习，需要做好，但要想在一次有限的实验学时内把它们完全搞清楚，也是不可能的。应当根据实验

目的，抓住关键性的重要问题首先解决，对某些零散的枝节性问题可以滞后一步解决，以集中精力，提高学习效率。

五、注意培养良好的实验习惯

良好的实验习惯是经过反复训练而巩固下来的并变成自身需要的科学行为方式。它对保证实验的正常进行，确保实验中的安全，保护实验仪器的正常运作，防止差错的发生将产生潜在的影响或直接的作用。良好的实验习惯是科学工作者文化修养和综合素质的反映和体现。因此，培养良好的实验习惯应该是学生从事科学实验基本训练开端和基础的物理实验课程的一个重要任务。

怎样培养良好的实验习惯呢？

良好的实验习惯是和严肃认真、一丝不苟的作风紧密相连的，需要从一件件十分具体的“小事”做起。例如，要养成做每个实验之前，先了解一下该实验全貌的习惯；要养成使用任何一种仪器之前，先了解它的精度、量程，以及先调整或校正，然后再使用的习惯；要养成在实验记录中尊重实验事实的习惯；要养成在实验报告中记录实验日期和环境条件的习惯；要养成科学摆放实验仪器的习惯；要养成在放置较重仪器时，先部分放下再全部放下，在搬动轻巧仪器时，左手托、右手档的双手配合习惯；要养成安全用电的习惯；要养成使用电学仪器时，先开启总电源开关，再开启仪器开关，使用完毕后先关闭仪器开关，再关闭总电源开关的习惯；要养成对某些仪器短路保护的 habit；要养成不用手直接触摸光学元件工作面的习惯；要养成保持实验环境清洁整齐，以及遵守实验室规则、保护实验设备、节约实验材料的习惯等。

千万不要认为，良好的实验习惯仅仅是区区小事而不必重视。不良的实验习惯一旦形成，将很难改正，还会对今后的科学工作产生潜在危害，甚至会造成重大损失。

对于一个孤立的单个实验来说，良好的实验习惯往往因很细小、太简单、易明白、好掌握而被初学者所忽视。其实，良好实验习惯的养成并非是一件简单的事情，进行实验的目的性、顽强性、果断性和自制性这些具有意志特征的优良品质，以及抓住某些特异现象不放的强烈好奇心和求知欲，是良好实验习惯的最高境界。

良好的实验习惯是综合素质的重要组成部分，需要经过很多实验的总结、反思、回顾和实验中的不断磨炼才能形成。当你形成了稳定的良好实验习惯之后，你的科学实验素养就会在不知不觉中进入到一个更高的层次。

物理实验是理论与实践相结合，实验方法与科学思维相结合，课上与课下相结合的一门独立课程。它包括实验方法、实验条件、仪器装置、实验设计、操作测量、数据处理以及实验分析等诸多方面，每一个方面都有其自身的特点和规律，并形成许多实验思想。要学习好物理实验决不是一件轻而易举的事情，必须在掌握基本知识、基本技能和基本方法的训练中，在动手能力、观察能力、分析能力和表达能力的培养中，在养成良好实验习惯的磨炼中，以及在感悟和体验物理实验的文化内涵和智慧魅力中把自己逐渐培养成懂理论、能动手、善思维、具有较高科学素质的高级工程技术人才。

第二章 误差分析与数据处理

物理实验有两大类：一是定性实验，它通过定性地观察物理现象和变化过程来弄清研究对象的物理性质或规律，不必进行精确的测量；二是定量实验，通过定量地测量物理量并确定物理量之间的关系，来定量地表明物理性质或物理规律。

要测量，就要有测量仪器，本质上讲，测量过程就是测量仪器与被测系统相互作用并在仪器上显示的过程。由于仪器精度的限制以及仪器和环境对被测系统的不可控制的影响，仪器显示的数值并非是被测系统真实的物理量，测量总有误差。此外被测物理量本身也具有随机性，如大量宏观热力学量（密度、温度、压强等）的数值都是统计平均值，而微观物理量的测量更是不可预言的，故可以这样讲，测量是个随机过程，被测量是个随机变量，需用概率论和数理统计的方法来处理实验数据和分析测量结果。深入分析测量结果和处理实验数据需要有丰富的物理实验经验和数学知识，这里仅就其基本知识作一个简介，希望有助于读者逐步建立起误差分析的思想，学会简单的数据处理，正确表达测量结果。

2.1 测量误差

一、测量

什么是测量？测量是将待测的物理量与选为标准（即作为计量单位）的同类量进行比较，定出它是标准量多少倍的过程。这个倍数叫做测量的读数，读数加上单位记录下来即为测量数据。

1. 直接测量和间接测量

测量可分为直接测量和间接测量两种。凡是直接由仪器读数获得测量值的过程称为直接测量，如用天平称衡质量，用电流表测量电流等；而通过对与待测量有函数关系的其他量的测量以得到该待测量之量值的过程称为间接测量，如测量一个圆柱体的体积，则可用米尺或游标卡尺等测出圆柱体的直径和高后，利用圆柱体体积与其直径和高的函数关系可计算出体积。

直接测量是基本的、简单的；而间接测量是大量的、复杂的。随着现代测量技术特别是传感器技术和电子信息技术的迅速发展，原来大量复杂的间接测量正被相对简单的直接测量所替代，如电功率、速度等量的测量。

2. 等精度测量与非等精度测量

在测量过程中，影响测量结果的各种因素不发生改变的（多次）测量称为等精度测量，反之则称为非等精度测量。例如，同一个人，用同样的方法，使用同样的仪器并在同样的条件下对同一物理量进行多次的测量就是等精度测量。显见，等精度测量是一种