



21 世纪普通高等教育基础课规划教材

大学物理实验

冯忠耀 罗惠霞 主 编
张德恺 于明湘 副主编

PHYSICS



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

21 世纪普通高等教育基础课规划教材

大学物理实验

主 编 冯忠耀 罗惠霞

副主编 张德恺 于明湘

参 编 (按姓氏笔画排名)

于海萍 刘志刚 毕冬艳

周引穗 姚合宝 胡晓云



机械工业出版社

本书是西北大学“面向 21 世纪课程教材”，全书将物理实验分为四个部分：基础实验、提高应用实验、综合设计实验及计算机仿真与虚拟物理实验，覆盖了力学、热学、电磁学、光学、近代物理等领域的实验。在实验内容的安排上，考虑到各专业对物理实验的要求不同，在实验中增设了选做实验（第二课堂），以适应不同专业的要求，有利于学生个性的发展、提高他们对实验的兴趣。

本书可作为理工科非物理类专业大学物理实验课程的教材或参考书，也可供其他专业的学生和社会读者阅读。

图书在版编目（CIP）数据

大学物理实验/冯忠耀，罗惠霞主编. —北京：机械工业出版社，2009. 1

21 世纪普通高等教育基础课规划教材

ISBN 978-7-111-25451-5

I. 大… II. ①冯…②罗… III. 物理学—实验—高等学校—教材
IV. 04-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2008）第 165974 号

机械工业出版社（北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037）

责任编辑：张金奎 版式设计：霍永明 责任校对：张晓蓉

封面设计：鞠 杨 责任印制：李 妍

北京鑫海金澳胶印有限公司印刷装订

2009 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

184mm × 260mm · 20 印张 · 496 千字

标准书号：ISBN 978-7-111-25451-5

定价：30.00 元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

销售服务热线电话：（010）68326294

购书热线电话：（010）88379639 88379641 88379643

编辑热线电话：（010）88379178

封面无防伪标均为盗版

前言

物理学在科技人才的素质培养中占有重要的地位,而物理实验则是物理学的基础,物理实验这门课程曾经为培养 20 世纪的优秀人才作出了卓越的贡献。但是用发展的眼光来看,当前物理课程的教学内容与课程体系已与跨世纪的新观念、新的思维方法及交叉学科的协调发展不相适应,需要进行必要的改革。西北大学物理实验教学中心在多年物理实验教学改革和实践的基础上,编写了这本大学物理实验新教材,希望能为 21 世纪的人才培养发挥积极作用。

本书针对理工科大学生的要求和特点,以培养能力为主,打破了传统的力、热、电、光和近代物理实验各自独立的课程体系,把实验内容分成了若干个层次。第 1 章介绍了误差、有效数字和数据处理的基本方法;第 2 章介绍了基本物理量及常用测量仪器;第 3 章为基础实验;第 4 章为提高应用实验;第 5 章为综合设计实验;第 6 章为计算机仿真与虚拟物理实验。我们希望这样的安排能使学生更好地掌握实验的基本方法和基本技能,并为后续课程打下良好基础。

在教材编写时,我们力求做到以下几点:

1. 包含的实验内容和测量方法尽可能多一些,以供选择。
2. 考虑到授课对象主要是低年级学生,其阅读和自学能力较弱,因而在编写中突出了“提出问题—解决问题”的逻辑思维过程,并尽可能详细地介绍实验思想、实验方法的有关内容,便于学生读懂。
3. 每个实验都增加了选做内容,以满足实验能力较强者的需要。

实验教学是一项集体参与、共同协作的工作。本教材的形成凝聚了西北大学基础物理实验教学中心全体教师和实验技术人员(包括已经离开工作岗位的老前辈们)辛勤劳动的成果。几十年来,他们为了提高物理实验课的教学质量,在实验室建设、教材编写、教学内容和教学方法研究等方面做了大量的工作,进行了一系列的探索和改革,取得了可喜的成绩,为本教材的编写奠定了雄厚的基础。

以下人员参加了本书的编写工作:冯忠耀组织了本书的编写,对全书进行了统稿,编写了第 2.2 节,实验 3.1.2、3.1.3、4.2.2、4.3.1、4.3.2、4.3.3、4.3.4、4.3.5、4.4.1、4.4.2、4.4.3、5.1.1、5.2.1;罗惠霞编写了第 1 章,实验 3.1.1、3.2.1、4.1.3、5.2.2、5.2.3、5.2.4、5.2.5、5.2.6、5.2.7、5.2.8;张德恺编写了第 2.1 节,实验 3.2.2、3.2.3、4.1.1、4.1.2、4.1.4、4.2.1、5.1.2,第 6 章;于明湘编写了第 2.3 节,实验 3.3.1、3.3.2、3.3.3、4.5.1、4.5.2、4.6.1、5.1.3、5.1.4;姚合宝编写了绪论,修改了

第1章和光学实验；胡晓云编写了附录，修改了力学实验；毕冬艳编写了实验5.1.5；刘志刚编写了实验5.2.9、5.2.10；于海萍编写了实验5.1.6；周引穗在校稿、绘图中做了大量工作。

本书在编写过程中参考了兄弟院校有关教材并借鉴了其中宝贵的经验。本书还得到了“西北大学教改项目”的资助，得到了西北大学教务处、设备处、物理系领导及许多同仁的支持、鼓励和帮助，我们谨致以衷心的感谢。

由于编者水平有限，加之时间仓促，难免会有疏漏，恳请批评指正。

编 者

2008年11月

目 录

前言

绪论	1
----------	---

第 1 章 测量误差和数据处理

1.1 测量与误差	6
1.2 测量结果的最佳值与随机误差的估计	14
1.3 系统误差的发现与估计	22
1.4 测量结果的表示与不确定度评定	26
1.5 有效数字及其运算法则	32
1.6 数据处理的基本方法	37

第 2 章 基本物理量及常用测量仪器

2.1 力学、热学基本物理量及常用测量仪器	49
2.2 电学基本物理量及常用测量仪器	65
2.3 光学基本仪器及常用光源	74

第 3 章 基础实验

3.1 基本物理量的测量	89
实验 3.1.1 长度、质量的测量	89
实验 3.1.2 用示波器测时间	94
实验 3.1.3 直流电流的测量	101
3.2 物体运动规律的研究	108
实验 3.2.1 单摆的设计和研究	108
实验 3.2.2 谐振法测量刚体的转动惯量	112
实验 3.2.3 刚体定轴转动的研究	116
3.3 几何光学	120
实验 3.3.1 薄透镜的成像及其焦距的测量	120

实验 3.3.2 利用光的全反射测量介质的折射率	127
--------------------------------	-----

实验 3.3.3 分光计的调节和使用	134
--------------------------	-----

第 4 章 提高应用实验

4.1 力学测量	144
----------------	-----

实验 4.1.1 用落球法测量液体的粘度	144
----------------------------	-----

实验 4.1.2 钢丝弹性模量的测量	148
--------------------------	-----

实验 4.1.3 弹簧有效质量的测量	153
--------------------------	-----

实验 4.1.4 不同介质中声速的测量	157
---------------------------	-----

4.2 热学测量	162
----------------	-----

实验 4.2.1 液体比热容的测量	162
-------------------------	-----

实验 4.2.2 PN 结正向压降与温度的关系	166
-------------------------------	-----

4.3 直流、交流电路的测量	169
----------------------	-----

实验 4.3.1 电位差计测电动势及校准电流表	169
-------------------------------	-----

实验 4.3.2 惠斯通电桥测量金属电阻温度系数	173
--------------------------------	-----

实验 4.3.3 双臂电桥测量低电阻	178
--------------------------	-----

实验 4.3.4 电表的改装和校准	181
-------------------------	-----

实验 4.3.5 RLC 谐振电路的研究	186
------------------------------	-----

4.4 电磁场测量	189
-----------------	-----

实验 4.4.1 用电流场模拟静电场	190
--------------------------	-----

实验 4.4.2 霍耳效应及其应用	194
-------------------------	-----

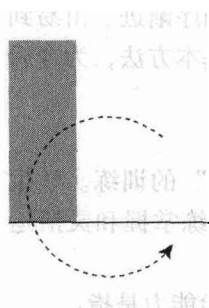
实验 4.4.3 电子束的偏转和聚焦	199
--------------------------	-----

4.5 光的干涉和衍射	204
-------------------	-----

实验 4.5.1 等厚干涉及其应用	204
-------------------------	-----

实验 4.5.2 单缝夫琅和费衍射及	
--------------------	--

光强分布的测量	211	6.3 计算机对实验过程的实时控制 ...	283
4.6 光的偏振与旋光	215	实验 6.3.1 温度测量	284
实验 4.6.1 旋光物质旋光率的 测量	215	实验 6.3.2 直流电动机转速测量 与控制	286
第 5 章 综合设计实验	224	实验 6.3.3 光照度检测与控制	288
5.1 综合实验	224	6.4 计算机仿真实验	289
实验 5.1.1 铁磁材料磁化特性的 研究	224	附录	292
实验 5.1.2 受迫振动与共振的 研究	232	附录 A 中华人民共和国法定计量 单位	292
实验 5.1.3 迈克耳逊干涉仪及 其应用	236	1. 国际单位制 (SI) 的基本单位	292
实验 5.1.4 光电效应和普朗克常量的 测量	241	2. 包括 SI 辅助单位在内的具有专门 名称的 SI 导出单位	292
实验 5.1.5 硅光电池特性的研究 ...	247	3. SI 词头	293
实验 5.1.6 密立根油滴实验	251	4. 可与国际单位制单位并用的我国 法定计量单位	293
5.2 设计实验	255	附录 B 常用物理数据	295
实验 5.2.1 数字万用表的设计与 组装	255	1. 常用物理常数	295
实验 5.2.2 不规则物体密度的测定 ...	261	2. 常用气体、固体、液体的密度表 ...	296
实验 5.2.3 液体密度测量数字化 设计	261	3. 固体材料的各向同性弹性模量	298
实验 5.2.4 用光杠杆测量微小几 何量	262	4. 表面张力系数	299
实验 5.2.5 粘度测量方法的比较与 研究	263	5. 液体的粘度	300
实验 5.2.6 声波衰减与介质和频率 关系的研究	264	6. 声速	301
实验 5.2.7 光干涉和衍射法测微 小几何量	266	7. 水的沸点和压强的关系	302
实验 5.2.8 简谐振动规律的研究 ...	266	8. 海平面上不同纬度处的重力加 速度*	304
实验 5.2.9 非平衡电桥测量金属 弹性模量的研究	267	9. 空气的相对湿度与干湿泡温度计 温差的关系	304
实验 5.2.10 霍尔元件传感器的 设计	268	10. 固、液体的膨胀系数	306
第 6 章 计算机仿真与虚拟物理 实验	269	11. 物质的比热容	306
6.1 计算机处理实验数据	270	12. 导热系数	307
6.2 计算机实时采集数据及数据 处理	275	13. 某些金属或合金的电阻率及其 温度系数*	308
		14. 热电偶分度表	309
		15. 一些物质的折射率 (对 $\lambda_D = 5.893 \times 10^{-7} \text{ m}$)	310
		16. 常用谱线波长	311
		17. 物质的相对电容率	312
		18. 几种纯金属的“红限”波长 及逸出功	313
		参考文献	314



绪 论

一、物理实验课的地位和作用

科学实验是科学理论的源泉，是工程技术的基础。作为培养科学研究人员和工程技术人才的高等学校，不仅要使学生学到比较多的理论知识，而且要使学生具备较强的科学实验能力，以适应科学技术不断进步的需要。

物理学是研究物质运动的普遍规律的科学，是其他自然科学的基础，也是一门实验性很强的学科。物理学发展史表明：实验是物理学发展的基础，又是检验物理学理论的标准。这就是说，物理学的两种研究方法都依赖于科学实验。其一是实验研究方法，亦称归纳法。它是以实验事实为依据，经过去粗取精、去伪存真的分析，并加以概括和总结，归纳出带有普遍意义的规律，建立物理学的理论。落体运动规律的发现和重力加速度概念的确立，法拉第电磁感应定律的提出，麦克斯韦电磁波理论的创立，以及人们对于光的波、粒二相性的认识过程，都是从科学实验中获得新发现的例证。其二是理论研究方法，亦称演绎法。它是在充分运用各种数学工具的基础上，通过一系列的推理、演绎过程，作出科学的预言或假设，发现新的物理规律。但是这些理论研究课题的提出仍需要实验事实作依据，这些预言、假设的正确性也必须通过实验去检验，才能被人们所承认。爱因斯坦在他的狭义相对论中预言的质能关系 ($E=mc^2$)，在几十年后的原子物理实验中得到了证实；李政道、杨振宁以 K 介子衰变的实验事实为依据提出在弱相互作用中宇称不守恒的理论，吴健雄以 $\text{Co}_{60}\beta$ 放射实验证明了他们理论的正确性。上述都是理论研究方法离不开科学实验的有力证据。

应该说，物理实验在物理学的创立和发展中占有十分重要的地位，实验的成败直接关系到物理学的命运。随着科学技术的发展，物理实验愈做愈精密，实验内容愈来愈丰富，许多物理科学的新思想、许多边缘科学的新理论还有待于物理学工作者去证明、去建立。因此，我们不仅应该掌握丰富的理论知识，而且还必须具备足够的现代科学实验的能力。

物理实验课是对高等学校学生进行科学实验基本训练的一门独立的必修基础课程，是学生进入大学后接受系统的实验方法和实验技能训练的开端，是理工科学生今后进行科学实验训练的重要基础知识。它对培养学生的独立工作能力，如何用实验方法研究物理现象与规律，掌握物理学领域的一些基本实验方法与技能，并配合课堂教学，掌握物理学的基本概念和基本规律都起着重要的作用。

物理实验教学和物理理论教学具有同等重要的地位，它们既有深刻的内在联系和配合，又有各自的任务和作用。

二、物理实验的目的和任务

本课程是在中学物理实验的基础上,按照物理实验的不同层次,本着循序渐进、由易到难的原则,学习物理实验知识、方法和技能,了解科学实验的主要过程与基本方法,为今后的学习和工作奠定良好的基础。

本课程的主要目的和任务是:

(1) 使学生获得实验的基本知识、基本方法和基本技能,即“三基本”的训练。学生必须充分认识到,科学实验能力的形成和提高是建立在对“三基本”的熟练掌握和灵活运用的基础上的。

(2) 培养基本的科学实验能力。就大学物理实验而言,基本的科学实验能力是指:

① 阅读理解能力。训练学生自行阅读实验教材和参考资料,正确理解实验的要求和内容,做好实验前的准备。

② 动手操作能力。借助教材和仪器说明书,正确调整和使用常用的基本仪器,实施实验方案。

③ 分析判断能力。运用所学的基本物理概念和知识,对实验现象和结果进行初步的分析判断,作出结论。

④ 书写表达能力。正确记录和处理实验数据,绘制图线,计算实验结果,分析测量误差,撰写合格的实验报告。

⑤ 简单的实验设计能力。能根据课题要求,确定实验方法和条件,合理选择仪器,拟定具体的实验方案。

(3) 使学生具备从事科学实验的基本素质。这里包括理论联系实际和实事求是的科学态度;严肃认真、一丝不苟的工作作风;不怕挫折、积极进取的探索精神;遵守操作规程、爱护器材的良好习惯。

(4) 通过实验的观察和分析,和课程教学相互配合,加深对物理概念和规律的认识,巩固和加强对所学内容的掌握。

物理实验虽然是在教师指导下进行,但在实验过程中,学生应该积极发挥学习的主动性,以研究者的态度去进行实验,组装调整仪器,进行观察和分析,探讨最佳的实验方案,认真进行测量,从中积累经验,训练技巧,为今后科学工作中设计实验方案、选择并使用新的仪器设备打下基础。同时,从一开始就应注意养成良好的科学态度和作风。

三、物理实验的教学程序和要求

物理实验和其他科学实验一样,一般可以分为如下几个阶段:

- 1) 确定研究课题
- 2) 制订研究计划和方案
- 3) 选择与准备实验装置和仪器设备
- 4) 进行实验测量与观察,获得实验数据与结果
- 5) 分析处理数据,得出结论
- 6) 撰写实验报告或论文

应该说,一项实验研究工作的最重要部分是前面三个阶段。科学实验发展史早就证明,杰出的科学实验要以杰出的构思为基础。但是,如何立题和制订实验方案不是初学者马上就可以掌握的,要有扎实的基础和优良的科学素养,要有经验的积累。因此,很难在早期的实

验中对学生进行这方面的训练。本课程作为初学者的基本训练, 主要进行后面三个阶段的学习和训练, 但在课程的后阶段, 适当安排了具有设计性的综合实验, 使学生们在制订实验方案、进行仪器的选择和合理配置等方面得到初步的训练。

物理实验教学主要包括密切相关的三个教学环节, 即实验前的准备(预习)、实验的操作、实验后的实验报告撰写。现将物理实验的教学程序及要求说明如下:

1. 实验前的准备(预习)

科学实验是一种有目的的实践活动。尽管最初的实验通常由教师制订方案和提出要求, 但学生在实验前必须力求理解实验方案的全貌。为此, 实验前需认真阅读实验教材, 明确该实验的目的、要求、实验原理、待测的物理量及测量方法。对实验中涉及的仪器, 预习时就要阅读教材中有关该仪器的介绍, 弄清其构造原理、使用操作方法和注意事项。必要时, 还可到实验室观看仪器实物或在多媒体计算机上进行仿真实验。在此基础上简明扼要地写出书面的预习报告, 其内容主要有两部分。

1) 简述实验原理: 只要求写出测量公式, 画出有关电路图、光路图或实验装置图, 并用自己的语言, 对图和公式作必要的说明(如各符号的物理意义、公式应满足的实验条件等)。

2) 画好数据表格: 为防止实验中漏测数据, 并使测量结果一目了然, 预习时应根据实验要求设计好数据记录表格。表格上要标明物理量符号、单位及测量次数等。

另外, 对预习中不清楚的问题, 也可写在预习报告中, 以便通过实验及时解决。

2. 实验的操作

在进入实验室正式进行实验测量前, 首先应该对提供的仪器设备是否完好、齐全进行检查, 并记录本实验中所用仪器的型号、编号和规格, 仔细阅读教材中有关仪器的介绍和使用注意事项, 然后再开始调整仪器。仪器调整是实验成败的重要环节, 应该十分重视, 认真进行, 使仪器在完全正常的状态下工作。调整完后, 要认真思考和安排好实验操作程序, 不要一上来就急于求成, 因为一些关键性步骤的疏忽或错误, 会导致整个实验的失败。对于电学实验, 一般还应由指导教师检查电路的接线, 正确无误后, 才可接通电源, 以防造成事故。

实验测试中, 不要单纯追求顺利地测好数据, 要养成对实验现象仔细观察和对所测数据随时进行分析判断的习惯, 这样才能及时发现和纠正差错。对实验中遇到的故障要积极思考, 尽可能自己排除。要如实记录实验测量的原始数据, 实验数据记录应做到整齐清洁而有条理, 养成列表记录数据的习惯, 以便于计算和复核。数据记录中, 如发现有错, 可以重新记录, 并对原来数据加上特殊符号(如“-”或“×”)。未重新测量决不允许修改实验数据。

其他如对于基本仪器的使用情况, 在实验中观察到的现象和存在的问题等等, 也可扼要记下。

实验结束后, 必须整理复原所使用的仪器, 断开电源, 关好水管。

3. 实验报告的撰写

完整的实验报告是在实验结束后完成的。撰写实验报告的过程是对实验内容进行总结并加深理解的过程, 目的是为了培养学生总结概括和分析表达的能力, 训练学生如何以书面的形式总结自己的实验成果, 为将来撰写科研论文打基础。写报告时, 要求文字通顺, 字迹端正, 数据齐全, 图表规范, 结果表示正确(包括误差的表示), 讨论认真。应该按自己的思

路来写。

实验报告的内容一般包括：

- 1) 实验名称
- 2) 实验目的
- 3) 仪器及用具（主要仪器的编号、规格等）
- 4) 实验原理（原理及方法简述）
- 5) 数据处理（包括数据表格、主要运算过程、误差估算，并明确表达出实验结果，有些实验若用作图法处理数据，应严格按作图规则，画出合乎要求的实验图线）
- 6) 问题讨论

实验的讨论是培养我们分析能力的非常重要的部分，应当努力去做。

实验后可供讨论的问题是多方面的，以下提示几点供参考：

- ① 实验的原理、方法、仪器给你留下什么印象，实验的目的完成的如何？
- ② 实验的系统误差表现在哪些地方，怎样改进测量方法或装置可以减小误差，对实验的改进有何设想？
- ③ 实验步骤怎样安排更好？
- ④ 观察到什么反常现象，遇到过什么困难，能否提出可供以后实验人员借鉴的东西？
- ⑤ 测量结果是否满意，如果未达到预期的结果，那么，原因是什么？
- ⑥ 对实验的安排（目的、要求、方法和仪器的配置等等）和教师的指导有何希望？

四、怎样学好物理实验课

要学好物理实验课不但要花气力下功夫，而且要有一定的学习方法。那么，怎样才能学好这门课程呢？

第一，注意掌握实验方法，特别是基本的测量方法。基本的测量方法往往是复杂的测量方法的基础，要弄明白它的道理，达到逐步熟悉和牢记。任何实验方法都有它的运用条件、优缺点，只有亲自认真做过实验才能对这些条件、优缺点有较深的印象。

第二，培养良好的实验习惯，从实验仪器、装置的安排到操作姿势、读数习惯等都应严格训练，不可轻视。良好的实验习惯是经历很多实验后的经验总结，它能保证实验安全，避免差错。要真正养成良好的习惯，不光是要经过多次实验，还要在每次实验中有意识地锻炼自己。

第三，逐步学会分析实验，排除实验中出现的各种故障，判断实验数据是否可靠，实验结果是否正确。这些问题主要靠分析实验本身来判断，即分析实验方法是否正确，它带来多大误差，仪器带来多大误差，实验环境有多大的影响等。当出现数据不佳时，千万不要根据理论值去拼凑数据，而要认真地去检查自己的操作和读数，进而去检查仪器与装置，找出毛病和故障。要力求自己动手解决，如解决不了，需要教师帮助时，要留意观察教师如何判断仪器的毛病及修复的方法，以提高自己的能力。

第四，掌握好重点。抓紧时间，认真做完辅助性工作，然后将主要精力放在重点学习的内容上，避免在枝节问题上消磨时间。

第五，认真写好实验报告。实验报告是本次实验的成果总结，认真写好实验报告，会加深对本次实验的理解，对思路的整理、实验的分析、印象的加深、结果的总结等都是有益的。甚至通过实验报告，还会进一步发现问题，使学习更加扎实、牢靠。

总之，要学会做实验不是一件容易的事情，学生应在学习过程中不断提高对实验的兴趣，不断总结经验。

五、物理实验课学生守则

- 1) 实验课不得迟到早退，迟到一刻钟以上者不能参加本次实验课，按旷课对待。
- 2) 课前必须认真预习，明确本次实验的任务和方法，写出预习报告，经指导教师考核许可后方可进行实验操作。没有预习者不得进行本次实验，本次实验成绩为“0”分。
- 3) 实验前对照提示牌仔细清点仪器，如发现缺损应及时向教师报告。实验后必须整理好仪器、座椅，并了解下次实验仪器后方可离开。
- 4) 爱护实验室一切仪器设施，不随意拆卸挪动。正确安排、调整、使用仪器。电学实验接线须经教师检查许可后，方能通电。
- 5) 实验中如发生事故，须保护现场（电子仪器断开电源）并立即报告教师。当事人应如实填写仪器损坏登记表，由教师签署意见。因违章操作造成仪器损坏者，要负责赔偿。
- 6) 以认真的态度和求实的作风做好每个实验，按时完成实验任务。实验测量数据必须当堂交教师审阅签字。
- 7) 禁止在实验室内喧哗、抽烟、吃东西、乱扔纸屑杂物，保持实验室的肃静、整洁和良好的实验环境。
- 8) 课后按教师要求清扫实验室。
- 9) 按时认真完成实验报告。交报告时应附上有教师签字的原始数据记录。
- 10) 凡无故缺课三次以上，或缺交报告三份以上者不得参加本学期考试。

第 1 章 测量误差和数据处理

测量是一切科学实验的主要组成部分。在物理学的发展历程中，对各种物理现象、物理状态或物理过程中各种量的准确测量是实验物理学的核心任务。

物理实验可分为两个层面，即定性地观察物理现象和定量地描述物理量值，二者是建立在对同一物理过程的共同观察与测量基础上的，定量描述必须通过规范的测量程序进行。在测量过程中，出现误差是不可避免的，亦即测量不可能是绝对准确的，所以对于测量结果必须进行可信度（或可靠性）估计或评价。否则，测量结果将毫无意义。本章将介绍测量误差、数据处理和不确定度评定等基础知识。

1.1 测量与误差

1.1.1 测量和单位

所谓测量（measurement），就是把确定的待测物理量直接或间接地与取作标准的单位同类量进行比较，得到比值的过程，这个比值就是待测物理量的测量值，选来作为标准的同类量称之为单位。可见，一个完整的“物理量”是由测量数值与物理单位共同构成的。

一个物理量的大小是客观存在的，选择不同的单位，相应的测量数值就有所不同。单位愈大，测量数值愈小，反之亦然。

根据《中华人民共和国计量法》，国家计量局于1987年2月1日发布了国家法定计量的单位名称、符号和非国家法定计量单位的废除办法。规定以国际单位制（SI制）为国家法定计量单位，即以米、千克、秒、安培、开尔文、摩尔、坎德拉作为基本单位（见表1.1.1）。其他量都由以上7个基本单位导出，称为国际单位制的导出单位，并规定1991年起实行国家法定计量单位。

表 1.1.1 国际单位制（SI）基本单位、辅助单位

物 理 量		单 位 名 称	单 位 符 号	定 义
基 本 单 位	长度	米 metre	m	1m 等于 ⁸⁶ Kr 原子的 2p ₁₀ —5d ₅ 能级之间跃迁所对应的辐射，在真空中的 1.65076373×10^6 个波长的长度。
	质量	千克 kilogram	kg	1kg 等于国际千克原器的质量。

(续)

物 理 量	单 位 名 称	单 位 符 号	定 义
基 本 单 位	时间	秒 second	s 1s 相当于 ^{133}Cs 原子基态两个超精细能级之间跃迁所对应辐射的 9.192631770×10^9 个周期的持续时间。
	温度	开 [尔文] Kelvin	K 1K 是水三相点热力学温度的 $1/273.16$ 。
	电流	安 [培] Ampere	A 当强度相等的恒定电流通过真空中相距 1 米的两根无限长且圆截面可忽略的平行直导线时, 若此两导线间每米长度上产生的力为 2×10^{-7} 牛顿, 则称此电流为 1A。
	物质的量	摩 [尔] mole	mol 1mol 是某物质系统的量, 该系统中所含的结构粒子 (原子、离子、分子等) 数与 $1.2 \times 10^{-2} \text{kg } ^{12}\text{C}$ 所含的原子数相等。
	光强度	坎 [德拉] candela	cd 在压力 $1.01325 \times 10^5 \text{N/m}^2$ 下, 处于铂凝固点的黑体 $1/600000 \text{m}^2$ 光滑表面在垂直方向上的发光强度为 1cd。
辅 助 单 位	平面角	弧度	rad 1rad 是一圆内两条半径之间的平面角, 这两条半径在圆周上所截弧长与半径相等。
	立体角	球面度	sr 球面度是一立体角, 其顶点位于球心, 它在球面上所截取的面积等于以球半径为边长的正方形的面积。

人们依据这些标准制成按一定单位刻度的工具、仪器或仪表, 以便定量测量。

1.1.2 测量的分类

一切测量必须在一定测量条件下进行, 测量时, 观测者对确定的测量对象, 必须利用适当的测量装置、仪器或设备, 并运用正确的测量方法。我们把观测者、测量对象、测量仪器、测量方法及测量条件统称为测量要素。例如学生用外径千分尺 (旧称螺旋测微器) 测量钢球的体积时, 观测者即学生, 测量对象是钢球, 测量仪器为外径千分尺, 测量方法是以外径千分尺顶砧间所实现的间隙直接与钢球直径进行比较, 并依所测的量值按照球体的体积公式计算钢球的体积, 而测量条件则可表现为周围环境的温度、室内的照明程度等。

测量方法和测量条件会对测量结果产生直接影响。物理量的测量按测量方法分为: 直接测量和间接测量; 按测量条件分为: 等精度测量和非等精度测量。

1. 直接测量

直接测量就是将待测量直接与标准仪器、仪表或量具进行对比, 从而直接读出待测量值的过程。例如用米尺测量长度, 天平称衡质量, 秒表测量时间间隔, 温度计测量温度, 电流表测量电流, 光度计测量光强度等均系直接测量。

当我们对某个物理量进行直接测量时, 可根据实际需要和可能, 进行单次测量、相同条件下的多次测量或人为改变实验条件反复测量多次。所谓相同条件是指观测者、所用仪器、测量原理和方法及外部环境等宏观条件相同。

2. 间接测量

对于一些没有提供直接读数仪表的物理量, 可以利用它与另外一些可以直接测出的物理量之间的函数关系, 间接求取, 这种测量称为间接测量。例如: 为测量直线运动物体的平均速度, 可以直接测量物体运动的路程 s 及通过这段路程所经历的时间 t , 然后, 由平均速度的定义式 $v = s/t$ 计算求出。为测量当地的重力加速度, 我们可以采用单摆装置, 直接测出单

摆的摆长 L 及摆动周期 T ，再依据单摆的周期公式 $T = 2\pi \sqrt{L/g}$ 求出 g 。

在物理量的测量中，能够进行直接测量的物理量较少，大部分物理量的测量，都需要使用间接测量的方法。一般地，物理实验过程几乎都是直接测量一些物理量，或通过物理量间已知的函数关系求出另外的物理量，或通过分析、概括和总结发现各物理量间规律性的联系，但直接测量是一切测量的基础。

3. 等精度测量

应该指出，为了确定实验手段或方法的可行性，检验实验仪器或装置的稳定性、重复性，判断实验结果的可靠性，验证物理规律的正确性，对间接测量量，往往不仅应该在宏观条件基本相同的情况下进行多次重复测量，而且需要人为地改变环境条件，变更测量仪器，变换测量方法，重选实验参量乃至调换观测者，反复测量多次。

对某一物理量进行多次测量，而且每次测量的条件都相同（如同一观察者、同一组仪器、同一种测量方法和在同样的环境条件下测试等等），测得的数据为 $x_1, x_2, \dots, x_n$ ，尽管各次测得的结果不完全相同，但我们没有任何充足的理由来判断哪一次更为精确。这样，我们只能认为这几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，并且把这样一组测量数列称为测量列。

4. 非等精度测量

在不同条件下对同一物理量进行的多次测量。即在观察者、测量仪器、测量方法和测量环境等测量条件中，只要有一个发生变化，这时所得到的测量结果的可靠性会有所不同。因此，这样的测量就是非等精度测量。

严格地说，在实验过程中保持对同一物理量进行多次测量的测量条件完全相同是极其困难的。但当某一条件的变化对结果的影响不大，甚至可以忽略时，仍可将此种测量视为等精度测量。在这一章里，除了特别指明外，我们都作为等精度测量来讨论。

1.1.3 误差的分类

测量的最终目的都是要得到物理量的客观真实值。由于认识能力不足和科学技术水平的限制，仪器制造不可能十分精确；或因外界环境条件的干扰，仪器的使用条件不易得到完全满足；或因观测者的测量方法和技能技巧程度的影响；或因物理量本身客观存在值发生变化；或者由于理论公式是建立在一定理论或一定条件基础上的抽象和简化，而实际测量都是在比理想模型复杂得多的客观环境中进行，如此等等，致使每一个测量要素对物理量的测量值均可能产生影响，从而使测量所得到的值与物理量的真值之间不可避免地产生差异。

我们把测量值 x 与真值 μ 之差叫做误差（error），用 δ_x 表示，则有

$$\delta_x = x - \mu \quad (1.1.1)$$

真值（true value）是指物理量的客观存在值。在一定时间内被测物理量的真值不发生变化，是一个理想情况。误差 δ_x 反映了测量值偏离真值的大小和方向，故称 δ_x 为绝对误差（absolute error）。绝对误差与测量值具有相同的量纲，其值可正可负（ $x > \mu$, $x < \mu$ ）。误差 δ_x 的绝对值越小，说明测量结果越接近真值。

对于大多数测量来说，被测量的真值是不知道的，常用多次测量的算术平均值 $\bar{x}$ 近似代替真值来计算误差，并用 Δx 表示测量的绝对误差。

一般情况下，测量的绝对误差不能全面衡量一组测量结果的优劣，当被测量不同时，

对于测量结果的优劣进行评估,还必须同时考虑被测物理量量值的大小。例如,测量两个物体的长度量,其量值分别为 1.0000cm 和 100.00cm,它们的绝对误差分别为 0.0020cm 和 0.05cm。从绝对误差看,前者的绝对误差远比后者的小,似乎前者的测量准确度高;但前者的误差占其测量值的 0.20%,而后者仅占 0.050%。显然,前一个测量的误差严重程度比后者大得多,我们就不能说前者的测量精度高。

为了区分或评价测量结果的优劣,引入相对误差 (relative error) 的概念。我们把被测量 x 的测量绝对误差与其近真值之比称作相对误差,用 E_x 表示。据定义有

$$E_x = \frac{\Delta x}{x} \times 100\% \quad (1.1.2)$$

有的被测物理量有理论值或公认值,我们把被测物理量的测量最佳值与其理论值 (或公认值) 的相对误差称作百分误差,即

$$E_x = \frac{|\text{测量最佳值} - \text{公认值}|}{\text{公认值}} \times 100\% \quad (1.1.3)$$

相对误差是一个纯数值,无量纲。

由于自然界中的一切物质都处于永恒运动中,因此,测量过程的自始至终,我们都无法知道被测物理量的真值。在物理实验中的真值一般是某种理论、某种模式的推演结果,或用准确度足够高的测量值作为该量的约定真值 (conventional true of a quantity)。有如下三种类型:

① 理论值或定义值:如三角形的三内角和等于 180° ,同一量的自身之差为零而自身之比为一等等。

② 计量学约定真值:国际计量大会决议的七种标准。

③ 标准器相对真值:高一级标准器的误差与低一级标准器或普通计量仪器的误差相比,为其 $1/5$ (或 $1/3 \sim 1/20$) 时,则可以认为前者是后者的相对真值。如 0.5 级电压表的电压值相对于 1.0 级电压表的电压值而言是真值。用 0.5 级电压表测得某电阻两端的电压值为 1.03V,而用 1.0 级电压表测得的电压值为 1.05V,则 1.0 级电压表测得的电压值的误差为 +0.02V。

综上所述,真值是未知的,误差也是无法计算的,因此说:误差存在于一切测量过程的始终。这一事实已为一切从事科学实验的人们所公认,故称之为误差公理。

测量与误差形影不离。随着科技水平的不断提高,测量误差可以被控制得越来越小,但一般不会是零。

测量误差作为一个整体决定于所有的误差源。只是为了研究方便,才根据误差的性质及产生原因将它们分为两大类:系统误差和随机误差。

1. 系统误差

系统误差 (systematic error, determinate error) 是测量误差的系统部分,被定义为:在相同条件下多次测量同一量时,误差的绝对值和符号恒定,或在条件改变时按某一确定规律变化的误差。

所谓确定的规律是指这种误差可以归结为某一个因素或某几个因素的函数,这种函数一般可以用解析公式、曲线或数表来表达。例如:某些电量是频率的函数,度盘偏心引起的角度的测量误差按正弦规律变化,尺长是温度的函数等等。由于变化规律的不同又可分为:恒定系统误差 (它包括恒正系统误差和恒负系统误差) 和未定系统误差 (线性系统误差、周期系统误差和复杂规律系统误差等等)。

系统误差主要来源于以下几个方面：

1) 仪器误差：这种误差是由于仪器的制造公差或未按规定条件使用所致。例如天平两臂不严格相等，米尺刻度不均匀，水银温度计毛细管内径不均匀，外径千分尺零点不准，放大器的非线性等。

2) 方法理论误差：它是由于测量所依据的理论公式本身的近似性，或测量条件不能满足理论公式所规定的要求，或测量方法有缺点所带来的误差。例如：单摆的周期公式 $g = 4\pi^2 L/T^2$ 成立的条件是摆角趋于零，实际实验中却不能达到，在小角度下也只是一个近似公式，若用该式测定重力加速度，则必然带来测量误差。又如，在测量空气比热容的实验中，要求其放气过程为准静态绝热过程，但实际上却不能实现。再如，在量热实验中要求系统与外界绝热，这实际上也不可能做到。

3) 个人误差：它是由观测者本身缺乏经验或心理、生理上的特点所致。例如：使用停表计时，由观测者的反应速度引起不同程度的提前或滞后的趋向给测量带来的误差；对标志读数时由观测者坐姿不正、或有习惯性的偏向而引起读数视差；用温度计测温时，由观察者的分辨能力以及心理因素引起的读数差异等。

4) 环境误差：由于环境（如温度、湿度、大气压、电磁场等）的影响而产生的误差。如在流体静力称衡法实验当中，由于水的温度的变化，引起水的密度发生改变导致被测物体密度的误差。又如，用等臂天平称量密度远大于或远小于钢质砝码的物体质量时，如果不对空气浮力的影响进行修正，测量结果将小于或大于该物的实际质量。

5) 装置误差：由于测量设备、仪器的安装、调整不当带来的误差，或因电路布置不当及电路中导线、电阻、开关等剩余电阻引入的误差。例如：在磁聚焦法测量电子荷质比的实验中，当仪器的螺线管与地磁场方向不平行时，就会使得即使在偏转电压为零时，聚焦的电子束仍偏离荧光屏的中心，造成测量误差。在电磁学一类实验中，经常需要考虑磁电的屏蔽和良好的接地问题，以减少测量的系统误差。

由系统误差的特点及来源不难看出，相同条件下的多次重复测量方法不能减弱或消除系统误差，但是它有可能帮助人们发现那些由于外界因素影响而导致的系统误差。改变实验条件进行反复测量，然后根据测量结果和实践经验进行分析，不仅可以发现系统误差的存在，找到产生这种误差的原因，而且还能尽量减弱以致消除某些系统误差对测量结果的影响。

2. 随机误差

测量误差（accidental error, indeterminate error）的随机部分称为随机误差，它被定义为：在相同条件下多次测量同一量时，误差时大时小，时正时负，无规则地涨落，但是对大量测量数据而言，其分布遵循统计规律。

随机误差主要来源于不确定或无法控制的随机因素，是由大量微小的涨落性的个别扰动累积而成的。如：1) 测量仪器的工作状态的随机变化；2) 待测物体的物理量本身的随机变化；3) 实际测量环境参数的随机涨落；4) 观察者分辨能力和读数上的随机变化等等。这些外界因素的微小扰动，使单个测量值的误差毫无规则，从而导致它们在大量测量中产生正负相消的机会。可见，相同条件下多次测量的算术平均值比单个测量值的随机误差小，所以增加测量次数可以减少随机误差。

应该指出：在任何一次测量中，一般系统误差和随机误差是同时存在的。测量结果的总误差应该是系统误差和随机误差的合成。由于系统误差和随机误差的性质不同，来源不同，