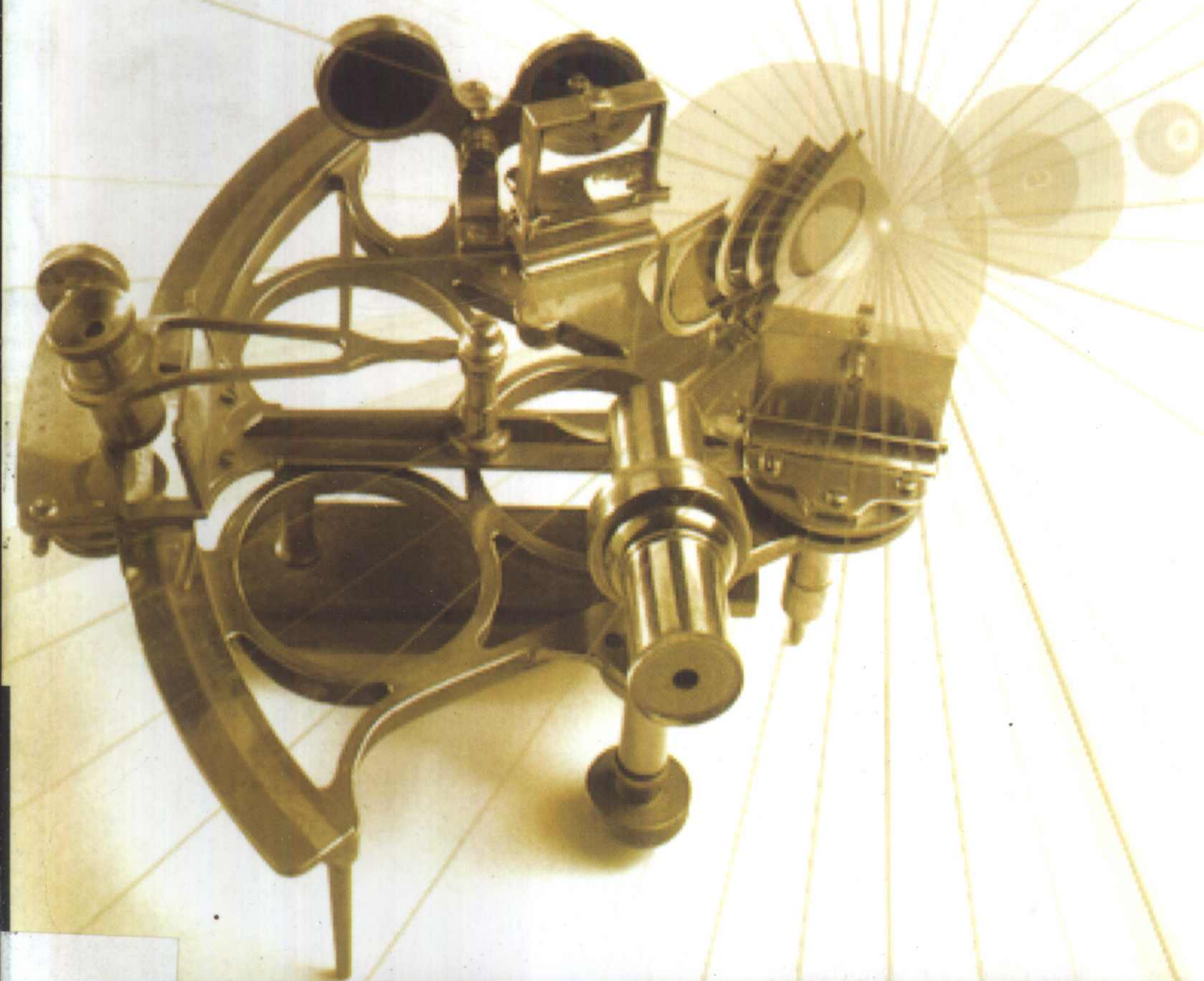




WULISHIYANJIAOCAI

物理实验

郝智明 主编



电子科技大学出版社
[Http://www.uestcp.edu.cn](http://www.uestcp.edu.cn)

物理实验

郝智明 主编

电子科技大学出版社

内 容 提 要

本书是根据《高等工业学校物理实验课程基本要求》编写而成的。

书中介绍了误差(包括不确定度)与数据处理的基本知识、常用的几种物理实验(测量)方法、一些基本物理量的测量以及常用仪器的原理与使用。全书共编排了包括力学、热学、电磁学、光学和近代物理学在内的实验 37 个,其中基础实验 21 个、近代物理、综合及应用性实验 10 个、设计性实验 6 个;书末附表还介绍了有关的物理常数值和单位。

本书可作为高等工业学校各专业的物理实验教材或参考书,也可供其他相关人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

物理实验/郝智明主编. —成都:电子科技大学出版社, 2001. 8

ISBN 7—81065—715—1

I. 物... II. 郝... III. 物理学—实验—高等学校—教学参考资料
IV. O4-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2001) 第 051063 号

物 理 实 验

郝智明 主编

出 版: 电子科技大学出版社 (成都建设北路二段四号, 邮编: 610054)

责任编辑: 周清芳

发 行: 新华书店经销

印 刷: 四川导向印务有限公司

开 本: 787×1092 1/16 印张 17.25 字数 420 千字

版 次: 2001 年 8 月第 1 版

印 次: 2001 年 8 月第 1 次印刷

书 号: ISBN 7—81065—715—1/O·26

印 数: 1—4000 册

定 价: 20.80 元

前 言

本书是根据全国工科物理课程指导组制订的《高等工业学校物理实验课程教学基本要求》，以及电子科技大学近几年使用的实验讲义和现开出的实验为基础编写的物理实验教材。

实验物理课程是教育部确定的六门主要基础课程之一，是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课程。作为教材，在编写时，既要注意到它的系统性、科学性，也要注意它的现代性、应用性。为此，我们对一些实验进行了取舍和调整，同时编入了一些新实验。

全书共分五章。第一章“误差与数据处理”，其内容略高于“基本要求”。误差估计只介绍了标准偏差，并用不确定度来评价测量结果；另外还介绍了四种处理数据的方法。

第二章“基本实验方法与常用物理量的测量”，介绍了“基本要求”中要了解的几种物理实验（测量）方法，以及如何测量一些常用物理量和有关的常用仪器。由于是具有共性的基础知识，故集中在一章之中，但不需全部讲授。

第三、第四章选编了 31 个实验。在编排上不是按力、热、电、光和近代物理分章，而是分为基础物理实验（第三章）和近代物理、综合及应用性实验（第四章）两章。31 个实验不可能都做，可根据具体情况选做。

第五章“设计性实验”，是按实验教学应“开发学生智能，培养与提高学生科学实验能力和素养”的根本目的而编排的。本章只提出了实验目的、要求、可提供的仪器和必要的提示，其实验原理、方法、选择合适的仪器和做出的结果都由同学经过分析自己完成。

根据物理实验课必须预习这一特点，我们在每个实验中都列出了预习提要，以帮助同学预习。另外，在每个实验的格式中，没有实验步骤，只有实验内容，力图让同学在仔细阅读实验原理和仪器装置介绍后，根据实验内容完成实验，以避免不预习、不了解实验原理和仪器，只要照教材上的实验步骤做，也能完成实验的现象；同时特别注意培养学生查阅资料和看说明书的能力。为了引导学生在实验后进一步分析讨论、巩固提高，还列出了思考题。

本书由郝智明主编。参加编写的有郝智明（第一章、实验 14 和附表）、蒲荣富（第二章、实验 1、2、4、18、26）、陈彦（实验 19、24、31）、姚列明（实验 8、9、21、23、29）、徐行同（实验 11、27）、陈群宇（实验 3、5、6、7、10、16、17）、陈中均（实验 20、22、30）、李朝霞（实验 15、28）、许春青（实验 25）和樊光汉（实验 12、13 和第五章）。实验教学是集体的事业，实验教材的编写实际上是同仁们历年来工作的总结。同时在编写本书时参阅了许多兄弟院校的有关教材，在此我们表示衷心的感谢。

由于编者的知识水平和教学经验有限，再加之编写时间仓促，书中难免有谬误之处，望读者批评指正。

编 者
2001 年 3 月

目 录

绪论	(1)
第一章 误差与数据处理	(5)
第一节 测量与误差	(5)
第二节 实验不确定度	(14)
第三节 有效数字	(20)
第四节 数据处理	(24)
附录	(31)
习题	(34)
第二章 基本实验方法与常用物理量的测量	(37)
引言	(37)
第一节 基本实验方法	(37)
第二节 长度的测量和量具量仪	(39)
第三节 质量的测量及仪器	(46)
第四节 时间的测量及仪器	(51)
第五节 角度测量	(54)
第六节 温度的测量及仪器	(54)
第七节 电流、电压和电阻的测量	(59)
第八节 实验室常用电源与光源	(69)
第三章 基础物理实验	(73)
引言	(73)
实验1 气轨上动量守恒定律的研究	(73)
实验2 用拉伸法测量金属丝的杨氏模量	(78)
实验3 刚体转动惯量的测定	(82)
实验4 用落球法测量液体的粘度系数	(86)
实验5 线膨胀系数的测量	(89)
实验6 比热容的测量	(91)
实验7 电阻元件伏安特性的测定	(95)
实验8 惠斯登电桥测电阻	(99)
实验9 非平衡电桥电压输出特性研究	(105)
实验10 电势差计测电动势	(109)
实验11 静电场模拟	(113)

实验 12	电子束的静电聚焦与电磁偏转	(118)
实验 13	电子束的磁聚焦及电子比荷的测定	(124)
实验 14	示波器的调整与应用	(128)
14-1	示波器的调整使用	(128)
14-2	示波器的应用	(135)
实验 15	霍耳效应法测量磁场	(140)
实验 16	铁磁材料的磁化曲线和磁滞回线的测绘	(144)
16-1	用冲击电流计法测绘铁磁材料的磁化曲线和磁滞回线	(144)
16-2	用示波器法测绘铁磁材料的磁化曲线和磁滞回线	(151)
实验 17	透镜焦距的测定和组装显微镜	(155)
实验 18	分光计的调整和使用	(160)
实验 19	用牛顿环测透镜的曲率半径	(170)
实验 20	用光栅测光波波长	(174)
实验 21	偏振光的特性研究	(177)
第四章	近代物理、综合及应用性实验	(184)
引言		(184)
实验 22	超声声速的测定	(184)
实验 23	压力传感器特性研究及其应用	(188)
实验 24	音频信号光纤传输技术	(192)
实验 25	照相技术	(199)
实验 26	光学全息照相	(210)
实验 27	迈克尔孙干涉仪的调整与使用	(217)
实验 28	光电效应法测普朗克常数	(223)
实验 29	光栅单色仪的使用	(229)
实验 30	密立根油滴实验——电子电荷的测定	(236)
实验 31	夫兰克-赫兹实验	(242)
第五章	设计性实验	(248)
引言		(248)
实验 32	重力加速度的研究	(252)
实验 33	简谐振动的研究	(253)
实验 34	电势差计校准电表和测电阻	(255)
实验 35	RC 串联电路充电、放电过程研究	(256)
实验 36	光栅特性的研究	(258)
实验 37	制作全息光栅	(260)
附表		(263)
附表 1	国际单位制的基本单位和辅助单位	(263)

附表 2	国际单位制中具有专门名称的导出单位	(263)
附表 3	国际单位制的组合单位示例	(264)
附表 4	用于构成十进倍数和分数单位的词头	(264)
附表 5	基本物理常量部分	(264)
附表 6	常见物质的密度	(265)
附表 7	海平面上不同纬度处的重力加速度	(265)
附表 8	部分液体的粘度系数	(266)
附表 9	部分固体和液体的比热容	(266)
附表 10	在 20℃ 时部分金属的杨氏模量	(267)
附表 11	某些金属或合金与铂 (化学纯) 构成温差电偶时的温差电动势	(267)
附表 12	某些金属和合金的电阻率及温度系数	(267)
附表 13	常用光源的谱线波长 (单位 nm)	(268)

绪 论

一、物理实验的作用与地位

物理学是一门实验科学，无论是物理概念的产生还是物理规律的发现都是建立在严格的科学实验基础上的，同时，建立起来的理论正确与否也必须通过实验来验证。因此，物理实验在物理学的发展过程中的重要地位和作用就不言而喻了。

在古代社会中就已有物理实验。我国元代赵友钦根据他所做的光学实验证明了光的直进性，还说明了光源的大小和强度、光源与不同直径小孔的距离、像的大小和亮度这三者的复杂关系。而古阿拉伯人伊本·海赛木则通过大量的光学实验认定光线在不同介质的界面上折射时，入射线、折射线和法线在同一平面上，同时正确指出人能看见物体是由于物体发出的光线进入人眼所致等。他的实验结果和解释为近代光学的研究奠定了基础。

在15世纪以前，物理实验基本上是对生产过程和自然过程的直接观察，是记录和整理生产经验和观察到的自然事实，而专门以探索为目的的活动不多。真正把科学的实验方法引入物理学研究中来，从而使物理学走上真正科学道路的是16世纪意大利物理学家伽利略。为了彻底否定亚里士多德关于速度与外力成正比等错误的运动学理论，伽利略在做了著名的比萨斜塔实验后又做了斜面实验。在设计思想巧妙的斜面实验中，他把难以直接测量的速度和时间的关系，转化为路程和时间的关系，并通过实验的研究和数学推理得到了反映匀加速直线运动重要特性的时间平方定律，从而断定斜面运动是匀加速直线运动；在改变斜面倾斜度实验时获得同样的定律，推断出自由落体运动也应是匀加速运动，从而揭示出自由落体运动之谜。伽利略卓越的实验思想和实验方法结合数学的分析、归纳和演绎确立科学的定律，是他研究方法的精髓，也是他留给后人的宝贵财富。

在16世纪和17世纪，科学的实验方法已初具规模，但许多实验是以隔离某些因素，排除外部干扰来进行的，而不是以强化和激化自然过程为主。到了19世纪这种实验方法才得到充分发展。现举电磁学的发展来说明。实验证明了摩擦能生电、莱顿瓶能储存电。18世纪80年代法国物理学家库仑在开文迪许等人实验的基础上对静电现象进行定量的测量，确立了静电学的基本定律——库仑定律，奠定了电磁学的基础。1800年意大利教授伏打用锌片与铜片夹以盐水浸湿的纸片做成电堆进行实验，使人们第一次获得持续电流——伽伐尼电池，为电流研究准备了物质基础。在19世纪以前，人们普遍接受吉尔伯特的观点，认为电和磁是两种本质不同的现象。1820年丹麦物理学家奥斯特在课堂演示时发现了电磁现象，以后通过实验证明了电流与磁之间有相互作用，冲破了电与磁无关的学说。同年法国物理学家安培通过实验证明了电流与电流之间有相互作用，提出了一切磁现象起源于电流的假说。与此同时，法国物理学家毕奥和萨伐尔通过实验总结出直线电流对磁针作用正比

于电流强度、反比于距离的实验规律。全面研究电与磁相互转化关系的是英国自学成才的物理学家法拉第。他经过连续 10 年的实验，在 1831 年实现了“磁性发电”的设想，并结合实验进行了定量计算，总结出了电磁感应定律。英国物理学家麦克斯韦发展了法拉第关于场的概念，系统总结了电学和磁学的新成就，提出了著名的电磁场理论。在这个理论中，他预言了电磁波的存在，并预见到光也是一种电磁波。麦克斯韦的电磁理论把电、磁和光三个领域综合到一起，具有划时代意义。但这个预言只有在 20 年后由德国物理学家赫兹从实验发现了电磁波之后，才真正被人们所接受。

在现代物理学的进展中，物理实验起着更重要的作用。20 世纪物理学的革命首先是电子、X 射线和放射性，它们都是物理学家致力于实验研究的结果。在 19 世纪中叶，不少物理学家在低压气体放电管的实验研究中发现了阴极射线，并认为是一种电磁波。这个世纪末期，英国物理学家汤姆逊用不同方法，对不同的阴极和气体产生的阴极射线进行比荷的测量，都得到相近的结果，认为阴极射线是带电的微粒子流，而不是一种电磁辐射，这个微粒就是电子。英国物理学家密立根在著名的油滴实验中，得到了精确的电子电量，并证明了一个电子的电量 e 是电荷的基本单位。电子是人类认识的第一个基本粒子。

19 世纪末，德国物理学家伦琴在用真空放电管做实验时发现了另一种性质不同于阴极射线的射线——X 射线。X 射线的发现，暗示人们在原子内部有着复杂的结构，宣布 20 世纪新的物理学即将到来。其实伦琴不是第一个看到 X 射线的人，而它被伦琴发现是由于他十分重视实验在科学研究中的作用。伦琴认为“实验是最有力的、最可靠的手段，能使我们揭示自然之谜。实验是判断假说应当保留还是放弃的最后鉴定。”这对我们是很有教益的。

继 X 射线之后，法国的贝克勒尔发现铀盐会自动放出一种新射线，1897 年居里夫妇发现了钍、钋和镭等元素也放出与 X 射线不同的射线，英国物理学家卢瑟福在 1900 年前后通过实验发现了 α 、 β 和 γ 射线，并通过实验分别被证明为氦的正离子流、电子流和原子核内部的电磁波。这些射线由放射性产生的。电子、X 射线和放射性的发现，以实验动摇了关于原子不可分的观点，把物理学从经典物理阶段推进到现代物理阶段，科学实验也从只观测宏观现象进入到同时考察微观现象，使物理学进入到一个新的领域。

理论的正确与否是需要实验进行检验的。正确的就发展，错误的就摒弃。在物理学发展史中这类例子很多，现仅举光的波动、微粒说之争和爱因斯坦的相对论被人们接受的例子来说明。

在人们探索光的本质的过程中，出现了长达三个世纪的所谓“微粒说”和“波动说”之争。这个争端反映了唯物辩证法对立统一的规律。1666 年牛顿提出了光的微粒说，同一时代另一著名学者荷兰物理学家惠更斯于 1678 年提出了波动说，由于牛顿的声望和波动说的粗糙，微粒说占了上风。1801 年英国医生托马斯·杨做了双缝干涉实验，动摇了微粒说的统治地位，以后又通过菲涅耳等人的实验支持了波动说。在 19 世纪末，波动说占了绝对优势。在 20 世纪初，光电效应实验又揭示了光的粒子性，1923 年康普顿在 X 射线散射实验中，发现了康普顿效应，证实并使人们认识到光的波粒二象性。

在 19 世纪末到 20 世纪初，伟大的物理学家、科学巨匠爱因斯坦在物理实验和理论的基础上，创立了具有划时代意义的广义相对论学说。这一学说提出后，当时很难被人们接受，还是在观测到水星近日点的进动、光谱线的红移和引力场会使光线弯曲等事实之后，才被人们广泛接受。

从上面的描述中可知物理实验的重要性是显而易见的，当然在强调实验重要性时，绝不意味着理论不重要。在物理学的发展中，理论和实验有着同等的重要性，任何轻视理论或实验的态度都是不对的。

二、大学物理实验课程的作用、任务和基本要求

1. 作用

大学物理实验是对高等工科学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，是学生进入大学后受到系统实验方法和实验技能训练的开端，是工科类专业对学生进行科学实验训练的重要基础。

本课程应使学生在中学物理实验的基础上，按照循序渐进的原则，学习物理实验的方法，得到实验技能的训练，从而初步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实验基础。

2. 任务

(1) 通过对实验现象的观察、分析和对物理量的测量，学习物理实验知识，加深对物理学原理的理解。

(2) 培养与提高学生的科学实验能力。其中包括：能够通过阅读实验教材与资料，做好实验前的准备；能够借助教材或仪器说明书正确使用常用仪器；能够运用物理学理论对实验现象进行初步分析判断；能够正确记录和处理数据，绘制曲线，说明实验结果，撰写合格的实验报告；能够完成简单的具有设计性内容的实验。

(3) 培养与提高学生的科学实验素养。要求学生具有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，主动研究的探索精神，遵守纪律、团结协作和爱护公共财产的优良品德。

3. 基本要求

通过物理实验的基本训练，要求做到：

(1) 能够自行完成预习、进行实验和撰写报告等主要实验程序。

(2) 能够调整实验装置，并基本掌握常用的操作技术。例如：零位调整；水平、铅直调整；光路的共轴调整；消视差调节；逐次逼近调节；根据给定的电路图正确接线等。

(3) 了解物理实验中常用的实验方法和测量方法。如比较、放大、转换、模拟、补偿、平衡和干涉等方法。

(4) 能够进行常用物理量的一般测量。例如：长度、质量、时间、热量、温度、电流强度、电压、电动势、电阻、磁感应强度、折射率等。

(5) 了解常用仪器的性能，并学会使用方法。例如：测长仪器、计时仪器、测温仪器、变阻器、电表、直流电桥、直流电势差计、通用示波器、低频信号发生器、分光计、常用电源和常用光源等。

在进行以上各项基本训练过程中，要重视对物理现象的观察和分析，运用理论去指导实践、解决实验中的问题。

三、大学物理实验课的基本教学程序

1. 实验前的预习

(1) 阅读实验教材的有关内容及参考资料，弄清实验的目的、原理和使用的仪器，全面地了解测量的方法、实验的内容和注意事项，并回答【预习提要】中提出的有关问题。

(2) 写好预习报告。预习报告的主要内容是：实验名称、目的、简要的实验原理（或主要的计算公式）、实验内容及仪器（要写出哪些是已知量，哪些是待测量，这些待测量用什么仪器去测量）、记录数据表格、遇到的问题及注意事项。

每次实验前，教师要检查预习情况，未预习者原则上不让做实验。

2. 实验中的观测

(1) 认真听讲：做实验前，教师要作简要的讲解，这对做好实验是很有益处的。学生要认真注意听讲，这样可起到事半功倍的效果。

(2) 实验操作：在操作前，先熟悉主要仪器，了解其使用方法，然后进行安装调试并检查仪器是否完好，如有问题要及时向教师提出，切不可盲目从事。待基本符合要求后，方可进行实验操作、测试数据。

(3) 记录数据及实验现象：应科学地、实事求是地记录下实验中的全部有关的原始数据和出现的各种现象。有关数据中除了直接的测量数据外，还应当包括实验条件（如与实验结果有关的温度、湿度、气压等）和主要仪器的名称、型号、规格、准确度等。在记录数据时要特别注意它的有效数字和单位。

测试结束后，把原始数据记录给教师审阅签名认可后，方可整理仪器结束实验。

3. 实验后的报告

(1) 实验名称。

(2) 实验目的。

(3) 实验原理：写出简要的原理及有关的计算公式（不写推导过程），如有必要的图（如电路图、光路图等），还要描绘出来。

(4) 实验仪器：包括实验用的所有仪器、量具和材料的名称、型号和规格等。

(5) 实验数据：把测得的原始数据及必要的中间计算结果认真地填写在设计好的记录表格之中，切忌不能用教师签字的那张原始数据代替实验报告的这部分内容。

(6) 数据处理：按所讲述的数据处理方法处理数据，并按结果表达式写出实验结果。

(7) 实验现象、误差分析、讨论以及对实验的建议、体会等。

(8) 附上经教师审核签字的原始数据记录。

实验报告一律用统一规定的实验报告纸书写，文体要端整，字句要简练，图表要按规定要求格式绘制。

第一章 误差与数据处理

物理实验有两个方面的任务：一是定性地观察物理现象和变化过程；二是定量地测量物理量并确定物理量之间的关系。要测量就会有误差，而误差的存在与大小将直接影响测量效果；要确定物理量之间的关系只有通过数据进行处理才能完成。因此，研究误差与数据处理是物理实验必不可少的。

当今误差与数据处理已成为一门学科，其中包含的内容很多，其理论基础是概率论与数理统计，又比较繁杂。本书不全面介绍误差与数据处理的内容，也过多地进行繁杂的数学推导与论证，只介绍一些常用的误差与数据处理的初步知识和作一些简单而必要的推导。

第一节 测量与误差

一、测量与误差的基本概念

(一) 测量

1. 测量的含义

测量是人类认识和改造客观世界的一种必不可少的重要手段。在物理实验中，特别是在定量研究中的测量是少不了的。

什么是测量？测量就是把待测物理量与作为计量单位的同类已知量相比较，找出被测量是单位多少倍的过程。这个倍数叫做测量的读数，读数加上单位记录下来就是数据。任何物理量都是有单位的。因此，在物理实验中，测量物理量记录数据时，一定不要忘记记录单位。

在完成一个测量时，必须明确测量对象、测量单位、测量方法和测量准确度，通常把这四点称为测量的四要素。

2. 测量的分类

在科学实验中会遇到各种类型的测量，我们可以从不同的角度对测量进行分类。按获得数据的方法可分为直接测量和间接测量；按测量条件的不同可分为等精度测量和非等精度测量。

a. 直接测量和间接测量

直接测量：直接由仪器标尺（刻度）读数而获得被测量的值的测量，称为直接测量。例

如，用游标卡尺测量长度，用秒表测时间，用天平称衡质量，用电流表测电流，用温度计测量温度等。

间接测量：有的物理量的测量很难通过仪器直接读数得到结果，但通过一些方法或找到这个量与某些能进行直接测量的量之间的函数关系（公式），就能算出被测量的大小，这种测量称为间接测量。例如，测量一个圆柱体的体积，就可利用公式（函数关系） $V=\pi R^2 h$ ，在用米尺或游标卡尺等测长仪器直接测出半径 R 和高 h 后，代入公式中算出 V 。通过这种方式进行 V 的测量就是间接测量。

间接测量是大量的，直接测量是基本的，任何间接测量都是通过直接测量来实现的。一个间接测量量在一定的条件下也可以进行直接测量。比如速度的测量，一般是直接测出时间 t 和在时间 t 内通过的路程 s 后，利用公式 $v=s/t$ 得到；而速度表则可通过直接读数测出车的速度。

b. 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条件不发生改变（多次）测量叫做等精度测量；反之，称为非等精度测量。例如，在相同的环境中，由同一个人，在同一台仪器上，采用同样的方法对同一物理量进行多次测量就是等精度测量。显然，它们的可靠程度是相同的，这就是说，对同一物理量进行可靠程度相同的多次测量就是等精度测量。如果在不同的环境中，或由不同人员，或在不同的仪器上，或采用不同的方法，总之在改变测量条件的情况下对同一物理量进行多次测量，其可靠程度是不相同的，即这种测量是非等精度测量。

一般非等精度测量是在科学研究、重要的精密测量等工作中，为了获得更可靠的测量结果而采用的，在数据处理时也比较复杂，所以一般情况下不用它。本书要求的都是等精度测量，至少也是视为等精度测量的。如果不是也要通过某种数据处理方法把它变为等精度测量。

（二）误差的基本概念

1. 真值

任何一个物理量在某一时刻和某一位置或某一状态下，都存在着一个客观值，这个客观值称为真值。

2. 绝对误差与相对误差

a. 绝对误差

测量当然希望得到真值，但不管测量仪器多么精密，采用的方法多么完整，环境多么稳定，实验人员的技术多么精湛，测量值与真值之间总存在着差异，这个差异就称为误差。其定义式为

$$\Delta' N(\text{误差}) = N_i(\text{测量值}) - N(\text{真值}) \quad (1-1-1)$$

由于是测量值对真值的绝对偏离，通常把它称为绝对误差。显然绝对误差除大小外，还有正负（方向）。由于是一个物理量，单位也不能忘记。

在实验中经常会碰到一个与误差相关的概念——修正值，其定义如下：

$$\Delta(\text{修正值}) = N(\text{真值}) - N_i(\text{测量值}) \quad (1-1-2)$$

由此可得

$$N(\text{真值}) = N_i(\text{测量值}) + \Delta(\text{修正值})$$

这说明，只要知道修正值，在得到测量值之后就可得到真值。

注意：从误差与修正值的定义中可知，误差与修正值只差一个符号。

b. 相对误差

绝对误差的大小能够反映对同一被测量的测量效果的好与差，比如对一长度为 1m 左右的物体进行测量，绝对误差为 5cm 的就比为 10cm 的测量效果好；但对不同的被测量就很难确定了，比如测量长为 1m 的物体的绝对误差是 1cm，测量长为 1dm 的物体的绝对误差为 0.5cm，用绝对误差就不能确定了。为此，引入相对误差的概念。如果相对误差用 E 来表示，其定义式是

$$E = \frac{\Delta' N}{N} \times 100\% \quad (1-1-3)$$

式 (1-1-3) 中， $\Delta' N$ 和 N 分别为绝对误差和真值（一般用算术平均值，甚至测量值来代替）。由相对误差的大小就可比较两个测量效果的好与差了。比如上述例子中，第一个测量效果就比第二个测量效果好，尽管它的绝对误差比第二个测量的大。

3. 误差的来源

在任何测量中都存在着误差，因此，测量时必须对误差进行分析。为了很好地分析误差，了解误差来源是很有必要的。误差的主要来源有下述几个方面。

a. 仪器误差

由于仪器本身的不完善或调整、使用不当，提供的标准量欠准或随时间的不稳性等产生的误差。

如等臂天平不等臂；分光计读数标线与角度盘不同心；螺旋测微计零点不准；需调水平、垂直等未达到；不满足使用条件；电路中电池电压随放电时间延迟而降低，引起电路中电流的变化；激光波长的长期稳定性变化等。

b. 方法误差

由于实验方法和理论的不完善或测量所依据的公式的近似性而导致的误差。

如伏安法测电阻，不管是采用内接法还是外接法，由于电表内阻的影响带来的误差；在推导单摆的周期公式 $T = 2\pi (l/g)^{1/2}$ 时，要求摆角趋于零，摆球的体积趋于零，实验时因做不到而带来的误差等。

c. 环境误差

由于各种环境因素，如温度、湿度、气压、振动、光照、电磁场等与要求的标准状态不一致及其在空间上的梯度随时间变化，引起测量仪器的量值变化、机构失灵、相互位置改变等产生的误差。

d. 人员误差

由于测量者生理上的最小分辨力、感觉器官的生理变化、反应速度和固有习惯引起的误差。如计时按表测量者滞后或超前的趋向；对准标志读数时始终偏左或偏右；用人眼判定光的强度来获取数据时，由于眼睛对光强分辨力不够带来的误差等。

4. 误差的分类

误差是各种各样的，它们各具特点，为了研究的方便必须对众多的误差进行分类。分类的方法不止一种，本书只采用按误差性质分类的方法，它可以分为“系统误差”和“偶

然误差”两大类。

a. 系统误差

在同一条件下多次测量同一量时误差的绝对值和符号保持不变，或在改变条件时，按某一确定的规律变化的误差，称为系统误差。显然，它的特点是恒定性。

例如，用一只未调零（如指针指在 2mV ）的电压表去测电压，不管测量多少次，每次测量由于未调零产生的误差（零差）都是 2mV ，这种误差就是系统误差；等臂天平不等臂造成的误差，分光计中由于度盘偏心引起角度测量的误差（此误差按正弦规律变化）等都是系统误差。

系统误差按掌握的程度可分为“已定系统误差”和“未定系统误差”。前者是大小和符号都知道的系统误差；后者则是或大小、或符号、或大小与符号都不知道的系统误差。

不论哪一种系统误差，根据其特点可知，不可能通过多次测量来减小或消除。

b. 偶然误差

在一定条件下对同一物理量进行多次测量，并极力消除或修正一切明显的系统误差之后，每次测量结果还会出现无规律的随机变化，其误差时大时小、时正时负，不可预测，但总体来说又服从一定统计规律的误差，称为偶然误差。它的特点是随机性，故有的又把偶然误差称为随机误差。

注意：所有的偶然误差都是随机误差，但随机误差不全是偶然误差，它还包含部分系统误差。

例如，在用物距像距法测凸透镜的焦距时需要测量像的位置，由于眼睛对像的清晰度的分辨本领不足而使每次读数不同产生的误差就是偶然误差。

根据偶然误差的特点可知，多次测量可以减小偶然误差。

c. 系统误差与偶然误差的关系

上面在讨论系统误差和偶然误差时是分别进行的，即是在没有偶然误差的情况下研究系统误差，和在系统误差可以不考虑的情况下研究偶然误差。实际上对任何一次实验，既存在着系统误差，又存在着偶然误差，只有一种误差的实验是不存在的。当然这样的情况是存在的，那就是有的实验以系统误差为主（如准确度较低的实验），有的实验以偶然误差为主（如准确度较高的实验），而忽略另一种误差的存在。

系统误差具有恒定性的特点，而偶然误差的特点是随机性。就其特点而论，似乎这两类误差是可绝然分开的，实际上并非完全如此。举一个简单例子，试分析用刻度不均匀的米尺给测量带来的误差。对米尺上某一确定位置的刻度值与真值之间的误差，不管测量多少次都是不会改变的，显然这个误差是系统误差；但对米尺的各处来讲，每个确定位置的刻度值与真值之间误差的大小和方向都不确定，具有随机性，显然这是偶然误差。再如某实验人员在读数时总习惯偏向一方，产生的误差是系统误差；另一实验人员在读数时没有总偏向一边的习惯，有时偏左，有时偏右，产生的误差无疑是偶然误差。系统误差与偶然误差的这种关系正好反映出这种分类方式的缺陷，实验不确定度（见第二节）就可以克服这个缺陷。

由于系统误差和偶然误差性质不同，所以处理的方法也不同。比如多次测量可以减小偶然误差，而对系统误差就无能为力，它只有用其他方法进行减少或消除。

d. 在实验过程中，除系统误差和偶然误差外，还可能出现仪器损坏、操作不当造成的

错误或读数、记录的错误等。这些错误不宜称为误差（有的把它称为粗大误差），因为误差不全等于错误。当然实验中应当避免错误的发生，只要注意，错误是一定能避免的。

5. 误差的几个相关概念

a. 精密度

精密度是指重复测量所得结果相互接近（或离散）的程度，它的高低反映偶然误差的大小。即精密度越高，数据越接近，偶然误差就越小；反之偶然误差就越大。

b. 正确度

正确度是指测量值或实验结果与真值的符合程度，它的高低反映系统误差的大小。即正确度越高，测量值越接近真值，系统误差就越小；反之，系统误差就越大。

c. 准确度

准确度（又称精确度）是精密度与正确度的综合反映。当偶然误差小到可以不计时，准确度等于正确度；当系统误差小到可忽略或得到修正消除时，准确度等于精密度。两者都高，准确度就高；两者之一低或两者都低，则准确度低。

它们之间的关系可以通过打靶形象地表示出来，如图 1-1-1 所示。

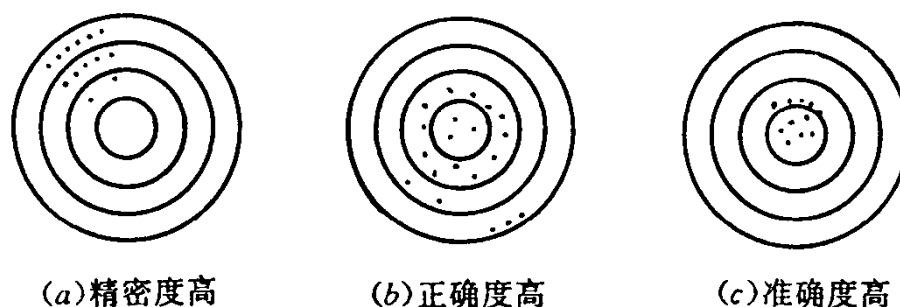


图 1-1-1 误差的几个相关概念示意图

另外，“精度”这个词还经常出现在各类实验书中，其实它是一个含义不确切的词，通常多指准确度。

二、直接测量偶然误差的估计

测量时误差不可避免，没有误差的测量是不存在的。误差的大小又直接关系到测量效果的好与差，因而进行误差计算的必要性就显而易见了。当然如果知道真值的话，我们可以根据式 (1-1-1) 来计算误差。例如三角形三内角和为 180° （理论值，即真值），测出三个内角的和是 $181^\circ 31'$ （测量值），那么误差就是 $1^\circ 31'$ 。不过知道真值来进行误差计算的情况不多，对测量而言也没有多大实际意义。有实际意义的是通过测量得到真值，只不过由于误差的存在，通过测量得不到真值，因此就很难用式 (1-1-1) 来计算误差。实际上误差是通过其他方法进行“估计”的。由于偶然误差服从统计分布规律，一般可通过数理统计的方法进行估计。用数理统计的方法来进行误差估计时，方法又有多种，我们只介绍其中的一种——标准偏差的估计方法。

1. 偶然误差服从的统计分布规律

大多数偶然误差的变化是均匀的、微小的和随机的。可以证明，这种偶然误差服从的统计规律是高斯分布，又称正态分布，如图 1-1-2 所示（除高斯分布外，还有很多种分布，如

均匀分布等)。其中横坐标 ΔN 表示误差, 纵坐标 $f(\Delta N)$ 表示在误差值为 ΔN 附近单位误差间隔内, 误差值 ΔN 出现的概率。

根据这个误差分布图, 可以看出偶然误差 (当然是指服从高斯分布的) 具有下列三种特性:

(1) 单峰性: 绝对值小的误差出现的概率大。

(2) 有界性: 在测量条件一定的情况下, 大误差出现的概率小, 且不超过一定的界限。

(3) 对称性: 绝对值相等的正负误差出现的概率相同。

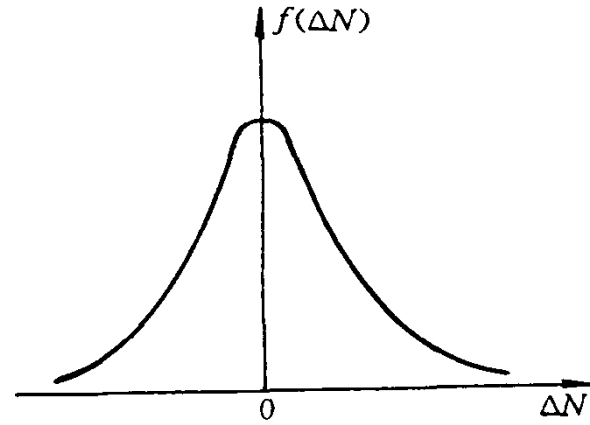


图 1-1-2 偶然误差的高斯分布

2. 以算术平均值表示真值

在相同条件下对某物理量进行 n 次等精度重复测量, 每次的测量值分别为 $N_1, N_2, \dots, N_n$, 真值为 N , 则任意一次测量的误差 $\Delta' N_i = N_i - N$ 。根据 (服从高斯分布的) 偶然误差的对称性, 即当 $n \rightarrow \infty$ 时, 绝对值相同的正负误差出现的概率相同, 有

$$\sum_{i=1}^n \Delta' N_i = 0 \quad (1-1-4)$$

即

$$(N_1 - N)(N_2 - N) + \dots + (N_n - N) = \sum_{i=1}^n N_i - nN = 0$$

$$N = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n N_i = \bar{N} \quad (1-1-5)$$

由式 (1-1-5) 可知, 在测量次数为无限次时, 其算术平均值 $\bar{N}$ 就是真值 N 。

实际上, 测量次数不可能是无限的, 相反, 都是有限的, 这时的算术平均值不是真值, 但它是最近真值的测量值, 称为测量的“近真值” (或称最佳值)。其测量误差可用测量值与平均值之差来表示, 可写为

$$\Delta N_i = N_i - \bar{N} \quad (1-1-6)$$

式 (1-1-6) 中, N_i 是多次测量中的任意一次测量值; ΔN_i 是任意一次测量值的绝对误差。

这种用算术平均值代替真值算出的误差, 称为“偏差”。显然误差与偏差是有区别的, 由于偏差与误差相差很小, 偏差就当作误差了, 但我们应当知道它们的区别。

3. 用标准偏差估计误差

我们已经知道, 大多数偶然误差都服从高斯分布。从高斯分布出发, 利用数理统计理论, 可以得到估计偶然误差的公式。下面就给出用标准偏差估计偶然误差的公式。

当测量次数 n 为有限时, 多次测量中任意一次测量值的标准偏差 S 为

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (N_i - \bar{N})^2}{n-1}} \quad (1-1-7)$$

算术平均值对真值的偏差 $S_{\bar{N}}$ 是一次测量值标准偏差 S 的 $\sqrt{n}$ 分之一, 即