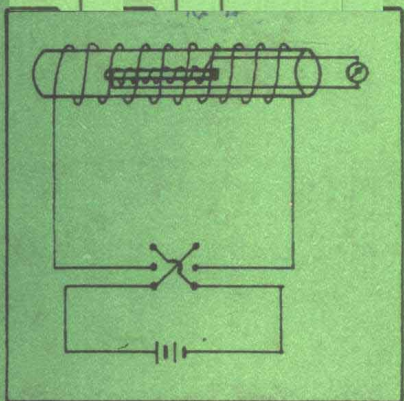
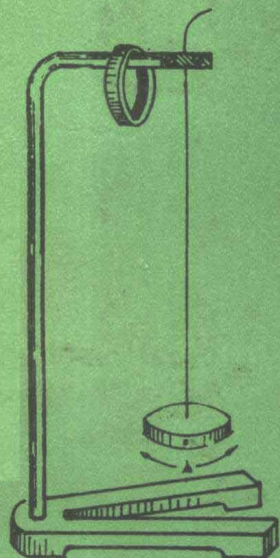
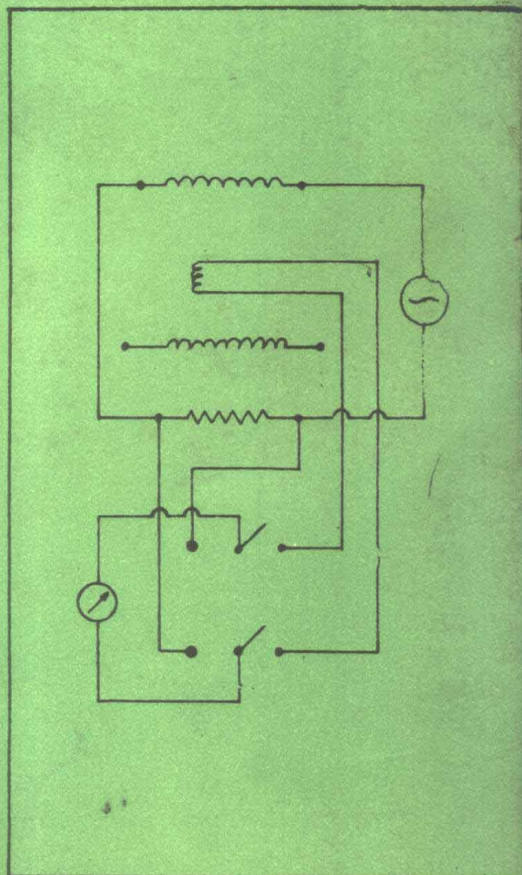
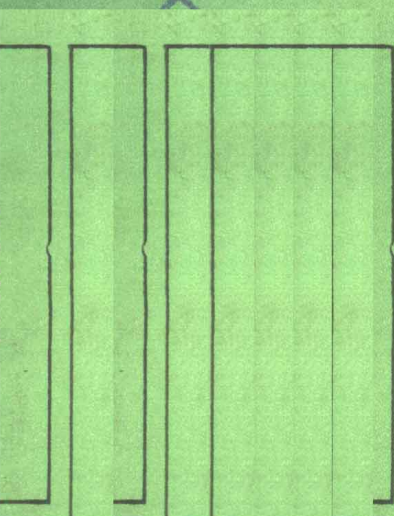
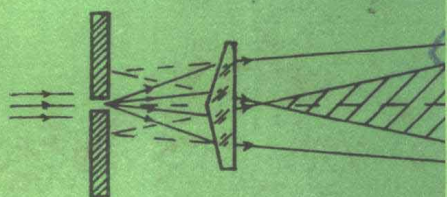


高等工科院校试用教材

基础物理实验

林良楼 张待勉 主 编



中国地质大学出版社

基础物理实验

林良楼 张待勉 主编

责任编辑 方 菊

责任校对 杨 霖

中国地质大学出版社出版

(武汉市 喻家山)

中国地质大学出版社印刷厂印刷 湖北省新华书店经销

开本 787×1092 1/16印张 12.125字数 300千字

1990年12月第1版 1990年12月第1次印刷

印数1——5000册

ISBN7-5625-0510-1/O·27

定价: 2.95元

内 容 简 介

本书是在中国地质大学长期使用的《物理实验讲义》的基础上,吸取近几年新的教学实践经验编写成的。全书实验分力学、分子物理、电磁学、光学、近代物理及设计性实验共36个,有较宽的选择性。本书收编的题目,注重教学价值,注重基本能力的严格训练。各种要求具体恰当、有层次(本科和专科);仪器选用侧重直观、通用;设计性实验或题内小设计项目,切合实际,易于实施推广。必要的习题、思考题、附录、附表完备。

本书适合作为高等工科院校物理实验课通用教材。

前 言

本书是以中国地质大学自编自用多年的《物理实验讲义》为基础,吸取了近几年物理实验课教学新经验加以充实、修订编写的。全书共有37个实验题目,包括:力学、分子物理实验13个;电磁学实验14个;光学实验10个;以及必要的附录、附表等。其中,在电磁学实验部分,有设计实验1个;内部含有小设计项目的实验3个,近代物理基础实验2个;在光学实验部分,有近代物理基础实验2个,设计实验1个。

本书遵循我国高等工科院校物理实验课的课程要求编写,适合作为工科物理实验课教材。题目的课时安排分别为:力学、分子物理实验每个2学时;电磁学实验每个3(或2)学时;光学实验每个4(或3)学时;即在电磁学及光学实验的各个题目中,实验内容的课时安排有2个层次,因此,本书除供本科生使用外,也便于课时安排较少的专业或专科学生选用。

本书内容安排重在实用,着重于基本能力的严格训练和各种物理量测量方法的掌握,并考虑到一般物理实验室的实际条件。选题侧重于典型、普遍及良好的教学效果,涉用的仪器设备注重直观、通用、耐用、满足精度要求。实验原理、实验方法的阐述力求简明扼要。实验观测内容的安排较丰富;基本方法、基本仪器的调节使用均特意地安排合理的重复训练。各个实验要求具体、课时配合恰当,采用本书作为实验教材,不需另配指导书或卡片。每个实验的末尾均设有几道思考题,旨在促进深入思考、研讨问题、拓展知识。在“数据处理和误差分析”、“电学基本仪器认识和接线训练”之后,配有相应的课外习题,以巩固、深化所授知识。

本书拟定的设计实验、题内小设计项目,以及几个近代物理的基础实验,涉及的仪器通用,可节省时间,易于推广、开设。并认为,在基础学习阶段,设计实验规模宜小不宜大。

为了便于兄弟院校选用本书作为教材,考虑到了各校物理仪器设备的部分差异,以及题目开设便于更换、选择,并满足学生实际做的题目与开设题目的数量比 ≥ 1.5 的A级评估要求,本书在满足规定的课程学时外,挑选余量 $> 50\%$ 。

本书首次公开出版,由于水平所限,时间匆促,欠缺、错误之处难免,切望用者不吝给予指正。

本书的出版,得到我校各级领导的关怀、鼓励 and 大力支持;我校物理教研室成批新老同事,承前继后长期努力参与实验室建设和教学实践的结晶,为本书编写提供了前提条件;周维公、段平芬、孟宪章、吴学梅、于丽萍……等技术人员,在本书的形成过程中作了大量宝贵的工作;周汉民副教授审阅了全稿,并提出了一些改进意见;刘翠兰同志为本书搜集了全部有关资料。编者借此一并表示感谢。

参加本书的编者有:林良楼、张待勉、冯肇全、洪德乐、王玉兰、丁毓常、魏文芹、孟宪章、罗瑞芝等。

编 者

1990年12月于中国地质大学

目 录

物理实验课须知	(1)
附录一 预习报告及实验报告提示	(3)
数据处理和误差分析	(4)
实验一 测量基本长度	(12)
实验二 自由落体运动实验	(18)
实验三 单摆	(21)
实验四 扭摆法测转动惯量	(23)
实验五 固体、液体密度测定	(27)
实验六 由拉伸形变测量金属的弹性模量	(32)
实验七 测定固体的线膨胀系数	(37)
实验八 扭称法测液体表面张力系数	(41)
实验九 用焦利氏秤测定液体表面张力系数	(44)
实验十 恒流法测液体的粘滞系数	(48)
附录二 测高仪的使用方法	(51)
实验十一 落球法测液体的粘滞系数	(53)
实验十二 空气的比热容比测定	(56)
※ ※ ※ ※ ※ ※ ※	
实验十三 电磁学基本仪器认识和接线训练	(59)
实验十四 改装双量程电表	(70)
实验十五 实用欧姆表设计	(75)
实验十六 惠斯登电桥测电阻 检流计内阻测量设计	(81)
实验十七 电位差计基本原理及应用 小设计	(85)
实验十八 2CW ₃₆ 稳压二极管特性曲线测量(设计)	(90)
实验十九 测绘模拟静电场	(92)
实验二十 热电偶温度计的定标及金属熔点测量	(97)
附录三 UJ-36型电位差计及其用法介绍	(100)
实验二十一 阴极射线示波器的使用	(101)
附录四 JXX (J2465) 简易学生信号源简介	(107)
附录五 XFD-7A型低频信号发生器简介	(108)
实验二十二 感应法测量非均匀磁场	(110)
实验二十三 用冲击电流计测定螺线管轴向磁场分布	(115)
附录六 墙式冲击电流计简介	(118)
实验二十四 用霍耳效应法测磁场	(121)
实验二十五 磁控管法测量电子荷质比	(127)
实验二十六 夫兰克-赫兹实验	(134)
附录七 夫兰克-赫兹实验仪器简介	(137)

※	※	※	※	※	※	※
实验二十七	分光计调节与使用	.....				(139)
实验二十八	用分光计测定三棱镜的色散	.....				(143)
实验二十九	光栅衍射测光栅常数及光波波长	.....				(148)
实验三十	双棱镜干涉测光波波长	.....				(151)
实验三十一	等厚干涉及应用	.....				(157)
实验三十二	单缝衍射	.....				(163)
实验三十三	偏振光的产生和观测	.....				(166)
附录八	WJZ型椭圆偏振仪安装方法简介	.....				(172)
实验三十四	光谱定标及里德伯 (Rydberg) 常数测定	.....				(173)
实验三十五	迈克尔逊干涉仪	.....				(177)
实验三十六	普朗克常数的测量设计	.....				(182)
※	※	※	※	※	※	※

附 表

附表 1	基本物理常数	.....	(183)
附表 2	单位词冠	.....	(183)
附表 3	在20℃时常用固体和液体的密度	.....	(184)
附表 4	在标准大气压下不同温度的水的密度	.....	(184)
附表 5	在海平面上不同纬度处的重力加速度	.....	(184)
附表 6	在20℃时某些金属的弹性模量 (杨氏模量)	.....	(185)
附表 7	固体的线膨胀系数	.....	(185)
附表 8	液体的比热	.....	(185)
附表 9	在20℃时跟空气接触的液体的表面张力系数	.....	(185)
附表10	在不同温度下跟空气接触的水的表面张力系数	.....	(186)
附表11	不同温度时水的粘滞系数	.....	(186)
附表12	液体的粘滞系数	.....	(186)
附表13	某些金属和合金的电阻率及其温度系数	.....	(186)
附表14	不同金属或合金与铂 (化学纯) 构成热电偶的热电动势 (热端在100℃, 冷端在0℃时)	.....	(187)
附表15	在常温下某些物质相对于空气的折射率	.....	(187)
附表16	常用光源的谱线波长表	.....	(187)

物理实验课须知

一、物理实验课的目的、任务

作为我国工科院校的大学生，未来肩负振兴中华、实现祖国高度文明昌盛的建设重任。在有限的学生时代，至关紧要的是掌握宽厚的基础理论，并练就从事科学实验的良好素质，以便将来在工作岗位上能适应当今科学技术迅猛发展的环境，具备开拓、创新的能力。

物理实验课是培养学生科学实验基本能力的一门必修的基础课。本课程开设一系列的物理实验项目，其目的、任务主要有以下几方面：

1. 训练阅读资料、掌握资料的能力。
 2. 训练理论联系实际，进行独立工作，独立分析实际问题的能力。
 3. 通过一系列物理量的实验观测，掌握科学实验各方面的基本知识，包括：掌握科学实验的一些基本的观测方法；掌握各种基本仪器的安装、调节、使用；掌握一些基本的数据处理方法、基本的误差估算和分析方法。
 4. 培养书写科学实验报告的表达能力。
 5. 培养严谨、认真、实事求是的科学实验作风。
 6. 通过各种物理现象的实验观测，深化物理概念、深化物理规律的理解。
- 以上这些，是物理理论课或其它理论课无法取代的。

二、物理实验课三个学习环节和要求

物理实验是一门实践性很强、内容广泛、观测要求十分严格的课程，学习的方式、方法，和理论课程比较有很大的差异，认真有序地对待物理实验课特有的三个学习环节，才能在各个方面达到应有的学习效果。三个环节及其要求如下：

1. 课前预习

物理实验课安排的每次课时，只能用于熟识仪器、安装调节和观测，因此，课前每人应按照实验顺序表排定的题目精读实验讲义及有关的附录、资料，充分领会实验原理、实验方法，观测内容和要求，并在此基础上写预习报告。预习报告作为实验报告的一部分，书写在专用的实验报告纸上。其内容和规格详见附录一。预习报告文字要通顺，表达要简明、正确，图表内容要完整，字迹要工整。预习报告要用蓝色墨水钢笔或圆珠笔书写，不许用红色笔或铅笔（作图可用铅笔）。

2. 实验

（1）进实验室时，要带齐文具、计算工具，要展示预习报告，并能回答查问，否则不许做实验。

（2）要按物理实验顺序表规定的仪器号码对号入座，使用指定的仪器，不要擅自动用别组仪器用具；如有仪器、用具、材料欠缺，应向老师提出帮助给予解决。

（3）听从老师指导。要先熟识仪器，遵照操作规程仔细安装调节，认真观测，正确记录。遇有问题要仔细分析判断、找出原因，力争自己解决，确实解决不了，要及时请老师帮助给予分析解决。

（4）使用电源的实验，必须请老师复查线路认可后，再接通电源。

(5) 应小心爱护仪器设备, 如有损坏, 要立即向老师报告, 并将详细情况进行登记, 由实验室管理人员酌情处理。

(6) 公用工具用毕, 要立即归还原处; 实验结束, 仪器用品要整理复原。

(7) 作完实验, 观测的数据要工整地填入预习报告中(不许涂改数据), 请老师审阅、签字之后即应离开实验室, 不得在实验室逗留, 干扰他人实验。

3. 处理数据完成报告

实验观测结束后, 要立即处理数据, 包括有关计算、误差分析计算、作图(关系曲线图), 完成报告。实验报告在下次实验课上交。对于老师批阅后下发的报告, 课后要认真看, 及早弄清存在的问题, 不要积累。

三、物理实验课成绩考核^[1]

根据物理实验课本身的特点, 物理实验课的总的学科成绩=平时成绩+课末考试成绩。并且, 平时成绩的比重大于考试成绩。

平时成绩以各次实验成绩求总平均计数; 每次实验成绩实行10分制, 分三部分评分, 即预习及预习报告2分、实验操作4分、数据处理及分析讨论4分, 这三部分凡有欠佳、错误、遗漏、作业迟交等, 各以1分为单位扣分; 未经老师签字的实验报告无效, 不予评阅记分; 抄袭他人的预习报告, 或抄袭他人的实验数据, 抄者与被抄者该次实验以记零分论处, 且不提供补做实验的机会; 因事、因病误课, 凭假条或医生证明补做实验; 因观测错误致使实验报告不能及格者, 凭老师的批示可以补做一次, 但后者补做实验的成绩必须扣操作分2分; 平时实验没有全部完成, 缺3次以上者不许参加课末考试。

课程考试内容包括全部已安排的实验, 考试方式为笔试, 涉及广泛。因此, 平时实验务必彻底掌握, 否则, 临时看书复习难以具体掌握。

凡实验总学时数偏少, 不要求考试的专科、函授, 其平时成绩作为本课程的考查成绩。

[1] 本书有关成绩考核的具体办法, 系中国地质大学多年执行的考核体制, 谨供采用本书的兄弟院校参考。

附录一 预习报告及实验报告提示

课 次实验报告

班号 日期
姓名 成绩 指导教师
实验名称:

目的

(简述)

实验原理

(简述实验根据, 写出计算公式, 标清公式中各符号的物理量含义, 仪器装置简图或实验线路; 公式推导过程不必写出)。

仪器

(列出主要仪器即可)。

实验步骤

(扼要叙述主要实验程序、测量的项目、注意事项、不要写出操作过程)。

数据记录及计算

(记录项目、表格可根据测量的项目、次数、计算等内容进行设计, 有部分实验可参考教材末尾提供的式样绘制, 但实验的原始数据应先记在草稿纸或教材中, 然后再工整地填写在报告上。计算包括测量值的计算、算出误差及写出结果的表达形式。有作图的实验, 要贴上图表)。

除了数据填写、计算、图表制作留在实验后进行外, 其它各项均作为预习报告预先写好。

数据处理和误差分析

实验能使某一自然现象人为地再现，以便于观察；并且可以人为地消除或抑制某些次要因素，突出主要因素，以便于确定各因素之间的定量关系，从中总结、归纳出规律。因此，实验是人们认识自然、寻求自然规律，并建立定律、定理和理论的重要方法；也是检验定律、定理和理论的基本手段。所以，任何一个科技工作者都必须具备从事实验工作的基本知识和技能。

实验，除了观察现象以外，更主要的是定量测量。测量所得的数据，必须有一套合理的记录、运算等处理方法，正确地反映测量条件和得出合理的测量结果；而测量条件的合理组合、测量结果的可靠程度，要运用误差分析予以确定。所以，第一次实验课专门介绍数据处理和误差分析的基本知识（有关物理实验课的目的任务、学习要求、考试考核等，请务必自行阅读“物理实验课须知”）。

一、测量数据的记录及其运算方法

1. 按有效数记录数据

在测量过程中，**测量读数一般都应该读到仪器最小刻度的1/10**。例如：用最小刻度为1mm的米尺测量物体的长度时，应该读（估计）到毫米的1/10。如图0.1所示，物长的读数应记为2.34cm；即使物体的端面正好对准刻线，估计的那一位数为“0”，也应该把它记录下来，不能省略。如图0.2所示，物长应为2.30cm。

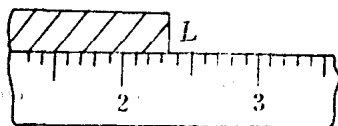


图0.1

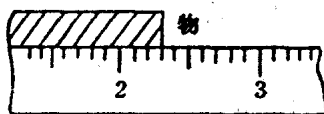


图0.2

按照这样记录下来的数包含有两个部分，即最小刻度以前的数是有刻度可读的，因而是准确可靠的，这部分的每一个数字都称为“可靠数字”；而最小刻度以后的那一位数是估计数，是不十分准确的，称为“可疑数字”。必须注意可靠数字和可疑数字都是有效的，统称为“有效数字”。按照这个规定记录的数据可称为“有效数据”。例如：在上述数据2.34cm中，“2”和“3”是可靠数字，“4”是可疑数字，这三位数字都是有效数字。

按有效数字记录的数据，不仅表示测量值的大小，而且，还能表示出所使用的测量仪器的精度（仪器的最小分度值）。使用的仪器精度愈高，测量所得数据的有效数字位数就愈多，相应地反映出测量值的精确度愈高。

有效数字的位数与小数点的位置无关，所以，可以变换单位。在数据变换单位时，有效数字前面增加的“0”不算有效数字；在有效数字后面不能加“0”，而应该用指数记数法表示。例如：2.30cm是三位有效数字，以m为单位记为0.0230m或 $2.30 \times 10^{-2} \text{m}$ ；如果以 μm 为单位，不能记为23 000 μm ，而应记为 $2.30 \times 10^4 \mu\text{m}$ ，仍然是三位有效数字。

2. 有效数的运算规则

测量所得的数据进一步按实验要求进行运算，对于有效数的运算应该遵守一定的规则，这些规则的总原则是：**计算结果一般只保留最大的一位可疑数字**，而把多余的可疑数字按四舍五入的方法处理。下面讨论在加减乘除运算中如何取舍。

(1) 加、减：例如：三数相加（以黑体数字表示可疑数字），

$$\begin{array}{r} 20.1 \\ 4.17 \\ +) 6.784 \\ \hline 31.054 \end{array}$$

可疑数字加（减）可疑数字或可疑数字加（减）可靠数字等于可疑数字（进位的数则不算可疑）。根据只保留一位可疑数字的原则，以上和数应为31.1，可疑数字的位置在小数点后第一位，与20.1的可疑数字的位置相同。而20.1中的可疑数是参与相加的三数中可疑数最大的。即和数中的可疑数字的位置，与参与相加的诸数中可疑数最大的位置相同。相减与相加有同样的规律。由此可得出加减的运算规则：

诸数相加减，计算结果的可疑数字的位置与参与加减的诸数中可疑数最大的位置相同。

(2) 相乘：两数相乘时，可疑数字乘可疑数字或可疑数字乘可靠数字 均得可疑数字（进位的数不算可疑），可靠数字乘可靠数字得可靠数字。至于如何确定最大可疑数字的位置，先看以下两例：

$$\begin{array}{r} 2.314 \\ \times) 3.6 \\ \hline 13884 \\ +) 6942 \\ \hline 8.3304 \end{array}$$

$$\begin{array}{r} 5.421 \\ \times) 3.2 \\ \hline 10842 \\ +) 16263 \\ \hline 17.3472 \end{array}$$

$$\therefore 2.314 \times 3.6 = 8.3; 5.421 \times 3.2 = 17.3.$$

由以上两例可见，积数的有效数字的位数与参与相乘的诸数中有效数字位数最少的相同或多一位。为了保证不丢失有效数字，可以采取下述规则：

诸数相乘，积数有效数字的位数比参与相乘诸数中有效数字位数最少的多取一位。

(3) 相除：相除是相乘的逆过程，可以证明，两数相除，商数的有效数字的位数与参与相除的两数中有效数字位数最少的位数相同或少一位。为了不丢失有效数字，可以采取下述规则：

诸数相除，商数的有效数字位数与参与相除的诸数中有效数字位数最少的相同。

另外，在运算过程中，参与相乘除的常数（如2， $\frac{1}{2}$ 等），不影响其它数据计算结果的有效数字的位数。其它的物理常量（如 π ， e 等）有效数字的位数应比参与计算的诸数中，有效数字最多的还多取一位。

二、图示及图解

1. 图示法

在实际中往往要求通过实验来反映一个物理量随另一个（或几个）物理量的变化而变化的规律。把实验所得的一组数据在坐标纸上作出相应的关系曲线，是数据处理的重要方法之一。

例如：一定量的空气，在温度不变的条件下，测定其压强 p 随容积 V 的变化关系，得到一组数据如表0.1。

表0.1

$p \times 13.33 \text{ Pa}$	29.0	27.0	25.0	22.8	21.0	19.1	17.0	15.0	13.0	11.0	10.0	9.0	8.0	6.8
$V(\text{cm}^3)$	9.3	9.8	10.5	11.6	12.5	13.7	15.5	17.6	20.2	23.6	25.7	28.4	32.2	37.2

以 p 、 V 为纵、横坐标，在等分格坐标纸上作 $p \sim V$ 关系曲线，如图0.3所示。作出曲线以后，不仅直观、形象、全貌地表示出 p 随 V 的变化关系，并且可将实验所得的分立的点关系，变为连续的线关系，在实验范围内，任意一个 p 值都可以从曲线上查出相应的 V 值。例如：当 $p = 18.0 \times 13.33 \text{ Pa}$ 时，相应 $V = 14.6 \text{ cm}^3$ 。这是图示法所特有的优点。

作图时应注意以下几点：

(1) 坐标纸的大小一般应以不降低有效数字的精度为原则。

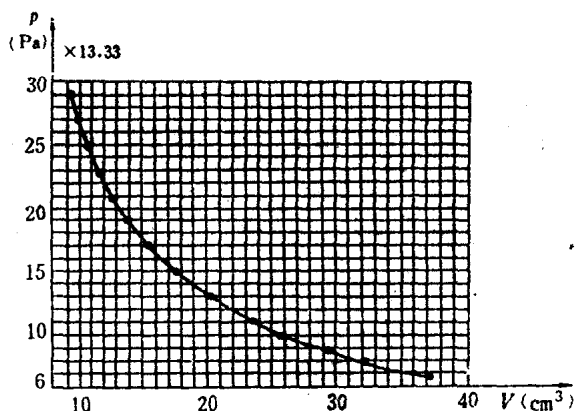
(2) 纵、横坐标轴每小格代表的量值比例不必要求一样，实验范围内变化量大的比例大些，变化量小的比例小些。

(3) 纵、横轴的相交点(原点)不一定从零开始，可由变化量值的范围而定，可取略小于起始点的一对数为交点，如图0.3取(8.0, 6.0)点相交。

(4) 以上2、3两点的选定原则是：不要使曲线偏于一边或一角，而是比较匀称分布在整个图面上。

(5) 纵、横轴均应标明比例值和代表的物理量符号及其单位。

(6) 标明曲线名称。

图0.3 空气 $p \sim V$ 关系曲线

2. 图解法建立方程式

作关系曲线图，除了直观反映两个物理量的变化关系外，还可以借助于关系曲线求解某些常数或建立变化规律的函数式。

例如：在研究自由落体运动时，测得物体下落的距离 d 与相应的时间 t 的关系，数据如表0.2所示：

表0.2

$d(\text{cm})$	30.1	85.3	150.4	223.6	274.2	350.0
$t(\text{s})$	0.248	0.418	0.553	0.676	0.748	0.845

把这一组数据在等分格坐标纸上作 $d \sim t$ 关系曲线图，如图0.4所示。根据曲线的形状来判断，它是一条指数曲线：这就是说 d 是 t 的指数函数。假定其函数形式为：

$$d = bt^a \quad (0.1)$$

式中： a 与 b 为待定常数。将(0.1)式两端取对数，则得：

$$\lg d = a \lg t + \lg b \quad (0.2)$$

可见，如果 d 是 t 的指数函数，则 $\lg d$ 与 $\lg t$ 应为线性关系，如将各数取对数以后，在等分格坐

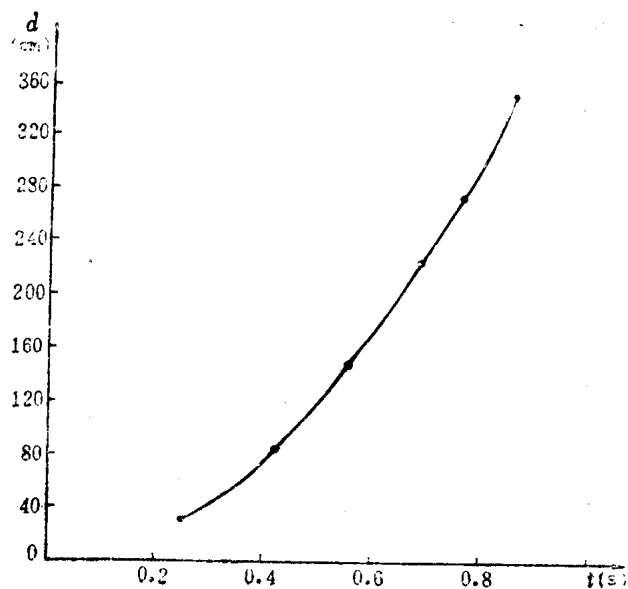


图0.4 自由落体 $d \sim t$ 曲线

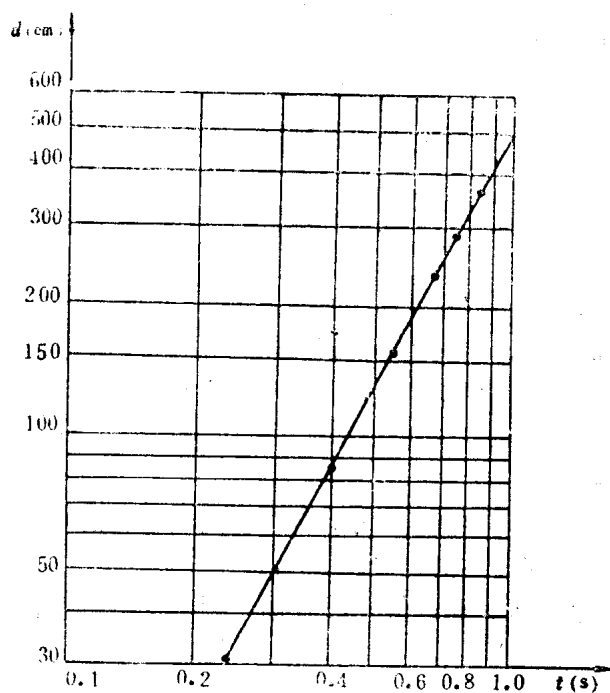


图0.5 自由落体 $d \sim t$ 对数曲线

标纸上作图或将数据直接在对数坐标纸上作图均应为一曲线。如图0.5为表0.2中的数据直接在对数坐标纸上作的图。根据图0.5可以确定常数 a 和 b 。方法如下：

在直线上任取两点 (d_1, t_1) 和 (d_2, t_2) ，则：

$$a = \frac{\lg d_2 - \lg d_1}{\lg t_2 - \lg t_1} = \frac{\lg(d_2/d_1)}{\lg(t_2/t_1)} \approx 2$$

再由(0.2)式可知,当 $\lg t=0$,即 $t=1$ 时,则得:

$$b=d \approx 490.$$

于是得到自由落体的 d 与 t 的关系式为:

$$d=490t^2(\text{cm}).$$

三、误差分析

1. 误差的基本概念

任何待测量都有一个客观存在的真实的值,叫做“真值”。但是由于种种原因,测量值一般都大于或小于真值。**测量值与真值之差称为误差**。任何测量值都存在一定的误差,测量精度高,误差小;精度低,则误差大。

由不同原因产生的误差有不同的特征,按其特征可以把误差分为两类:

(1)系统误差:如果对同一物理量在相同的条件下进行多次重复测量,误差的大小和正负不变或者随着某一测量条件的变化而有规律地变化。具有这种特征的误差,称为系统误差。

产生系统误差的原因大致有以下几方面:测量仪器存在缺陷;仪器安装、调整不符合要求;测量环境不符合要求;实验理论不完善或计算公式的近似性;测量者某种固有习性的影响等。

要消除或减少系统误差,必须针对产生的原因进行纠正或改善。完成这样的工作,要求在学识、实践经验和实验技能等方面有较高的水平。

(2)偶然误差:如果对同一物理量进行多次重复测量,误差的大小和正负都是变化的,并且它的变化是出于偶然而不可预测的,具有这种特征的误差,称为偶然误差,或称随机误差。

偶然误差是由测量仪器、测量对象、测量环境及测量者存在的不知道或尚未确切知道的因素引起的。

因为,偶然误差的大小和正负都具有偶然(随机)性,所以,服从一定的统计规律:即在对同一量进行多次重复测量时,绝对值小的误差比绝对值大的误差出现的几率大;任一误差值正、负出现的几率相同。正是由于偶然误差服从这样的统计规律,所以用多次重复测量取平均值的办法可以减小甚至可以消除偶然误差。

2. 绝对误差和相对误差

测定一个物理量,不仅要测定该量的大小,还要估定该测量值的误差,以便表明该测量值的可靠程度。下面介绍两种最基本的误差表示方法。

(1)设某物理量的真值为 X ,测量值为 x ,则 $|X-x|$ 定义为该测量值的绝对误差 Δx ,即:

$$\Delta x = |X - x|$$

绝对误差表示测量值与真值差异的绝对大小。

(2)为了更明确地表明测量值的可靠程度,将比值 $\Delta x/x$ 定义为相对误差 E ,即:

$$E = \Delta x / x$$

测量结果应表示为:

$$X = x \pm \Delta x; \quad E = \frac{\Delta x}{x} \times 100\%$$

前者表示真值 X 存在于 $(x+\Delta x)\sim(x-\Delta x)$ 的区间内；后者表示误差在测量值中所占的比例，其大小表示测量值的可靠程度或称准确度。

但因为真值是不知道的，所以不可能直接用以上定义式算出误差的大小，而要根据具体的测量情况进行估计。一般来讲，系统误差和偶然误差是同时存在的，但是，由于教学实验已经过教师和实验技术人员精心安排，把系统误差尽量减小，所以，下面主要讨论偶然误差的估计方法。

3. 测量的误差估计

有一些物理量是可以直接用仪器测量得到的（例如：长度、时间、质量、温度等），这类量的测量，称为直接测量。另一些量不可能直接测量，而是要对两个或多个物理量直接测量，再通过公式计算才能得到（例如面积、体积、速度、加速度等等），对这类量的测量，称为间接测量。现在分别讨论它们的误差估计如下：

（1）单次直接测量的误差估计：由于条件所限或因精度要求不高，只对某量进行一次测量，根据具体情况取测量仪器的最小量值（精度）或取最小量值的一半作为测量值的绝对误差。例如：用最小分格为1mm的米尺量长度，如果被测物体容易测准确，则取0.5mm为绝对误差，不容易测准确就取1mm为绝对误差。另有一些仪器（如卡尺、天平砝码等）是不能估读的，单次测量就取仪器最小量值为测量值的绝对误差。还有一些标有级别的仪器，如电阻箱、电表等，其单次测量的绝对误差可根据仪器的级别和测量值的大小计算取得。例如：用0.1级的电阻箱测定的测量值为 $R\Omega$ ，则测量值的绝对误差 $\Delta R=R\times 0.1\%$ 。

（2）多次直接测量误差的估计：假定对某量进行 n 次直接测量，各次测量值为 $x_1, x_2, \dots, x_n$ 。则其平均值为：

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (0.3)$$

各次测量值的绝对误差为 $\Delta x_1 = |\bar{x} - x_1|$ ， $\Delta x_2 = |\bar{x} - x_2|$ ，……， $\Delta x_n = |\bar{x} - x_n|$ ，平均值的绝对误差为：

$$\overline{\Delta x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta x_i \quad (0.4)$$

相对误差为：

$$E = \frac{\overline{\Delta x}}{\bar{x}} \times 100\% \quad (0.5)$$

测量结果为：

$$x = \bar{x} \pm \overline{\Delta x} \quad (0.6)$$

（3）间接测量的误差计算：假定间接测量物理量 Z 是直接测量物理量 x 和 y 通过公式计算得到的，其函数关系为 $Z=f(x, y)$ 。已知： x 和 y 的绝对误差为 Δx 和 Δy ， Z 的误差如何计算？

根据数学全微分在近似计算中的应用可知：

$$\Delta Z = \frac{\partial Z}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial Z}{\partial y} \Delta y,$$

但误差估计与纯数学运算不完全相同，误差估计必须包括最坏（误差最大）的情况，因此，必须取全微分各项绝对值之和，所以， Z 的绝对误差为：

$$\Delta Z = \left| \frac{\partial Z}{\partial x} \Delta x \right| + \left| \frac{\partial Z}{\partial y} \Delta y \right|.$$

把这个结果推广到一般情况：假定间接测量物理量 Z 是由直接测量物理量 $x_1, x_2, \dots, x_n$ 通过函数关系 $Z=f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 决定的，则 Z 的绝对误差公式为：

$$\begin{aligned}\Delta Z &= \left| \frac{\partial f}{\partial x_1} \Delta x_1 \right| + \left| \frac{\partial f}{\partial x_2} \Delta x_2 \right| + \dots + \left| \frac{\partial f}{\partial x_n} \Delta x_n \right| \\ &= \sum_{i=1}^n \left| \frac{\partial f}{\partial x_i} \Delta x_i \right|\end{aligned}\quad (0.7)$$

相对误差公式为：

$$\begin{aligned}E = \frac{\Delta Z}{Z} &= \left| \frac{1}{f(x_1, x_2, \dots, x_n)} \right| \sum_{i=1}^n \left| \frac{\partial f}{\partial x_i} \Delta x_i \right| \\ &= \sum_{i=1}^n \left| \frac{\partial \ln f}{\partial x_i} \Delta x_i \right|\end{aligned}\quad (0.8)$$

如果函数是以加减为主的多项式，则推导绝对误差公式比较方便，然后，用绝对误差与测量值之比（ $\Delta Z/Z$ ），求相对误差。如果函数是以乘除为主的多项式，则推导相对误差公式比较方便，然后，用测量值与相对误差相乘（ $Z \cdot E$ ）求绝对误差。

例：用比重瓶法测液体密度，计算公式为：

$$\rho = \frac{m_2 - m_0}{m_1 - m_0} \rho' \quad (0.9)$$

式中： m_0 为比重瓶的质量， m_1 为瓶装满水的质量， m_2 为瓶装满被测液体的质量， ρ' 为水的密度。该计算式是以乘除为主的多项式，所以，推导相对误差公式，比推导绝对误差公式方便。为了推导相对误差公式，首先将（0.9）式两端取对数，得：

$$\ln \rho = \ln(m_2 - m_0) - \ln(m_1 - m_0) + \ln \rho'$$

按照（0.8）式，分别对 m_0, m_1, m_2, ρ' 求偏微分，并取各项绝对值之和即得：

$$E = \frac{\Delta \rho}{\rho} = \left| \frac{(m_2 - m_0) \Delta m_0}{(m_1 - m_0)(m_2 - m_0)} \right| + \left| \frac{-\Delta m_1}{m_1 - m_0} \right| + \left| \frac{\Delta m_2}{m_2 - m_0} \right| + \left| \frac{\Delta \rho'}{\rho'} \right|$$

假定经测量得到 $m_0 = 14.45 \pm 0.05(\text{g})$ ， $m_1 = 39.60 \pm 0.05(\text{g})$ ， $m_2 = 34.80 \pm 0.05(\text{g})$ ， $\rho' = 1.000 \pm 0.005(\text{g})$ ，则：

$$\begin{aligned}\rho &= \frac{34.80 - 14.45}{39.60 - 14.45} \times 1.000 \\ &= \frac{20.35}{25.15} \times 1.000 = 0.8091(\text{g/cm}^3),\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}E &= \left| \frac{(34.80 - 39.60) \times 0.05}{(39.60 - 14.45)(34.80 - 14.45)} \right| + \left| \frac{-0.05}{39.60 - 14.45} \right| + \left| \frac{0.05}{34.80 - 14.45} \right| \\ &\quad + \left| \frac{0.005}{1.000} \right| = 0.99\%,\end{aligned}$$

$$\Delta \rho = \rho \cdot E = 0.8091 \times 0.99\% = 0.008(\text{g/cm}^3).$$

实验结果： $\rho = 0.809 \pm 0.008(\text{g/cm}^3)$ 。

相对误差一般取两位有效数字，两位以后的数四舍五入。绝对误差通常只取最大的一位数，第二位采取大于零就进一的办法去掉。在实验结果中，**测量值的最后一位数字的位置应与绝对误差数字的位置对齐**。例如：计算得到 $L = 4.526 \text{ mm}$ ， $\Delta L = 0.031 \text{ mm}$ ，应取为 $\Delta L = 0.04 \text{ mm}$ ，实验结果应写为：

$$L = 4.53 \pm 0.04(\text{mm}).$$

练 习 题

1. 把下列测量数据记录错误改正在括号中。

(1) 用有毫米刻度的米尺测量一些物体的长度为:

5 cm (); 10.2 cm (); 8.00 mm ();
16.050 cm (); 0.00350 m (); 4.81×10^{-3} km ()。

(2) 最小刻度为 1°C 的温度计, 量某些物体的温度记为:

22°C (); 0°C (); 85.00°C (); 10.05°C ()。

(3) 量限为10mA的电表, 表盘刻度为100小格, 用该毫安表量得二个电路的电流为:

3.0 mA (); 5.000×10^{-3} A ()。

2. 用电子停表测量单摆运动周期 T 七次所得数据如下列:

8.021 s; 8.025 s; 8.027 s; 8.020 s; 8.019 s; 8.024 s; 8.022 s。

求: T 的平均测量值、平均绝对误差 ΔT , 相对误差 E , 写出 T 的真值表示式。

3. 某一物理量: $N = \frac{(AB+BC)}{(A-C)}$, 测量数据: $A=271.05$, $B=1.56$; $C=1.3570$ 。请

正确计算出间接测量的物理量 $N_{\text{测}}=?$

4. 测量一个圆筒壳体的体积, 所得有关的量的大小为: 外径 $D=(10.2500 \pm 0.0005)\text{cm}$;
内径 $d=(10.1320 \pm 0.0005)\text{cm}$; 长度 $L=(30.63 \pm 0.05)\text{cm}$ 。

请写出圆筒壳体体积 V 的计算式, 导出 V 的相对误差 E 的计算式、写出绝对误差 ΔV 的计算式, 并用上述数据分别算出它们的结果, 最后写出实验结果表示式。

5. 改正下列实验数据作单位变换、结果表示式、数据运算的书写错误(改正在空括号内)

(1) $8.05\text{m}=8050\text{mm}$ (); $40.00\text{cm}=0.40\text{m}$ ()。

(2) $2.5\text{A}=2500\text{mA}$ (); $5.00\text{mA}=0.005\text{A}$ ()。

(3) 某合金密度 $\rho=2.785 \pm 0.03\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ()。

金属丝横截面积 $S=0.8053 \pm 2 \times 10^{-3}\text{cm}^2$ ()。

(4) $8.421 \times 1021=10.18941$ (); $18.4212+11.21=29.6312$ ();

$\pi \times (5.00)^2=78.53975$ ()。

6. 设某电阻阻值 R 随温度 T 变化的一组测量数据如下表:

$T(^{\circ}\text{C})$	30.0	4.00	5.00	6.00	7.00	8.00	90.0	100.0	110.0
$R(\Omega)$	40.29	40.40	40.51	40.59	40.71	40.79	40.91	41.01	41.10

请用毫米方格纸作出一张合格的 $R \sim T$ 关系曲线图。并根据曲线求出 $R \sim T$ 的实验方程式。