

高等学校教材

大学物理实验

吕军 主编

王景峰 副主编



高等教育出版社

高等学

大学物理实验

D A X U E W U L I S H I Y A N

吕 军 主 编

王景峰 副主编

张 颖 于世伟 朱景程

丁昌江 宋智青 陈 浩 王元宏 参 编

高等教育出版社·北京

内容提要

本书依据教育部物理学与天文学教学指导委员会编制的《理工科类大学物理实验课程教学基本要求》(2010年版)编写而成。全书共分三章,第一章系统地介绍了实验误差知识及测量不确定度的评定办法;第二章介绍了19个基础物理实验;第三章为综合性及设计性实验。内容的安排上,力求精讲原理,细讲实验实现的构思、仪器构造的剖析和操作注意事项。多个实验给出了供学生进一步拓展思维的选做内容。每个实验都配有一定数量的思考题,供学生课后思考练习。

本书可作为高等理工科院校的物理学实验教材或教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

大学物理实验/吕军主编;张颖等编.--北京:
高等教育出版社,2015.2

ISBN 978-7-04-042065-4

I. ①大… II. ①吕… ②张… III. ①物理学-实验
-高等学校-教材 IV. ①O4-33

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第024309号

策划编辑 王 硕
插图绘制 尹文军

责任编辑 王 硕
责任校对 刘丽娴

封面设计 李小璐
责任印制 韩 刚

版式设计 马敬茹

出版发行 高等教育出版社
社 址 北京市西城区德外大街4号
邮政编码 100120
印 刷 河北鹏盛贤印刷有限公司
开 本 787mm×1092mm 1/16
印 张 16
字 数 390千字
购书热线 010-58581118

咨询电话 400-810-0598
网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>
网上订购 <http://www.landaco.com>
<http://www.landaco.com.cn>
版 次 2015年2月第1版
印 次 2015年2月第1次印刷
定 价 28.50元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换
版权所有 侵权必究
物 料 号 42065-00

前 言

大学物理实验课是理工科专业学生的一门必修基础课,一般在大学一年级的第二学期或大学二年级的第一学期开设。大学物理实验课程要努力实现两个基本目标:一是培养学生实事求是的科学精神,二是培养学生大胆实践、小心论证的科学素养。

本书的编写继承了我校理学院物理实验中心(原基础部物理教研室)老一辈教师的写作风格。书的前身“大学物理实验讲义”,在我校试用已有近 50 年的历史。50 年的使用中,几代教师不断地修改完善,几易其稿,这里凝聚了他们的心血。随着岁月推移,物理实验由最初的 10 个左右,发展到今天的 20 多个。这些实验分别为,固体密度的测定、拉伸法测弹性模量、转动惯量的测定、电学元件伏安特性、滑线变阻器的使用及其特性的研究、电表的改装及校正、用电位差计测量电动势及电阻、霍尔效应的研究、用单双臂电桥测电阻、用模拟法测绘静电场、磁场分布测量、温差电偶的定标及电动势的测量、薄透镜成像及焦距的测定、等厚干涉、分光计的调整及应用、科技摄影、偏振光/旋光实验、光的干涉衍射实验和空气比热容比的测定等 19 个基础物理实验,以及示波器的使用、超声声速的测定、激光波长的测定、空气热机实验和非线性混沌实验等 5 个综合性、设计性实验。

全书共分三章,第一章系统地介绍了实验误差知识及测量不确定度的评定办法;第二章介绍了 19 个基础物理实验,分为力学篇、电磁学篇、光学篇和热学篇;第三章为综合性及设计性实验。多个实验给出了供学生进一步拓展思维的选作内容。每个实验都配有一定数量的思考题,供学生课上或课后思考。

本书的出版是我校几代教师共同劳动的成果。参加编写工作的教师有,吕军(绪论,第一章)、王景峰(§ 2.16, § 2.18, § 2.19)、朱景程(§ 2.1, § 2.2, § 2.3)、于世伟(§ 2.4, § 2.5, § 2.6)、张颖(§ 2.7, § 2.9, § 2.12)、丁昌江(§ 2.8, § 2.10, § 2.11)、王利福(§ 2.13, § 2.14, § 2.15)、宋智青(§ 2.17, § 3.2)、陈浩(§ 3.1, § 3.3, 附录),全书插图由王元宏和王景峰老师绘制。全书由吕军和王景峰统稿。

书中难免存在不足甚至谬误之处,欢迎广大师生在使用过程中指出。

编 者

2014 年 10 月

郑重声明

高等教育出版社依法对本书享有专有出版权。任何未经许可的复制、销售行为均违反《中华人民共和国著作权法》，其行为人将承担相应的民事责任和行政责任；构成犯罪的，将被依法追究刑事责任。为了维护市场秩序，保护读者的合法权益，避免读者误用盗版书造成不良后果，我社将配合行政执法部门和司法机关对违法犯罪的单位和个人进行严厉打击。社会各界人士如发现上述侵权行为，希望及时举报，本社将奖励举报有功人员。

反盗版举报电话 (010)58581897 58582371 58581879

反盗版举报传真 (010)82086060

反盗版举报邮箱 dd@hep.com.cn

通信地址 北京市西城区德外大街4号 高等教育出版社法务部

邮政编码 100120

目 录

绪论	1	§ 2.12 温差电偶的定标及 电动势的测量	110
第一章 测量不确定度的评定	4	光学篇	118
§ 1.1 测量和有效数字	4	§ 2.13 薄透镜成像及焦距的 测定	118
§ 1.2 误差初步知识	9	§ 2.14 等厚干涉	125
§ 1.3 实验不确定度的评定	12	§ 2.15 分光计的调整及 应用	134
第二章 基础实验	20	§ 2.16 科技摄影	142
力学篇	20	§ 2.17 偏振光旋光实验	158
§ 2.1 固体密度的测定	20	热学篇	170
§ 2.2 拉伸法测弹性模量	29	§ 2.18 空气比热容比的 测定	170
§ 2.3 刚体转动惯量的测定	37	§ 2.19 热机实验	174
电磁学篇	48	第三章 综合及设计实验	193
§ 2.4 电学元件伏安特性的 测定	48	§ 3.1 示波器的使用及超声声速 的测定	193
§ 2.5 滑线变阻器的使用及 其特性的研究	52	§ 3.2 光的干涉衍射实验	212
§ 2.6 电表的改装及校正	57	§ 3.3 非线性混沌实验	225
§ 2.7 用电位差计测量电动势 及电阻	62	附录	234
§ 2.8 霍尔效应的研究	73	参考文献	249
§ 2.9 用单双臂电桥测电阻	82		
§ 2.10 用模拟法测绘静电场	91		
§ 2.11 磁场分布测量	100		

结 论

物理学是研究物质运动基本规律的一门科学.任何一门科学都力图以尽可能少的、逻辑上相互独立的基本概念和基本假设为出发点,以对所研究对象的实际考察和综合把握为基础,构建自己的理论和实践体系.物理学经历了原始萌芽、经典物理和近现代物理三个时期,最初仅靠不充分观察和简单推理,直观笼统地把握自然现象,充其量只是古代自然哲学之一隅.以后逐渐发展为以仪器观测、数学定量为主,增强了揭示客观本质的能动性,体系渐趋公理化、数学化,作为一门实验科学的特点日益突出.以牛顿力学为代表的力、热、声、光、电体系,在与生产技术良性互动的进程中,在与数学、化学等基础学科相得益彰的同步发展中稳步提升了人类应对大自然的能力,逐渐扭转了科学落后于技术的境况,终于把人类社会推进到工业化时代.时至今日,经典科学的理论体系和实验框架仍然引领着人类常规的生存发展行为.物理实验课就是为学生提供经典物理学实践训练的一门课程,是进入大学后受到系统的实验方法和实验技能训练的开端,在培养科学素质和科学世界观的过程中扮演入门向导的角色.物理实验教学和物理理论教学是人类传承物理文化的两条重要途径,它们既有深刻的内在联系和配合,又有各自的任务和作用.

物理实验课的培养功能如下:

1. 通过对物理现象的观察、分析和对物理量的测量,学习科学实验知识,加深对物理学原理的理解.
2. 培养提高治学能力和工作能力.
 - (1) 自行阅读实验教材或资料,概括归纳要点,做好工作前的准备;
 - (2) 借助教材或仪器说明书正确使用仪器;
 - (3) 运用物理学理论对实验现象进行分析;
 - (4) 正确记录和处理实验数据,绘制曲线,说明实验结果,撰写合格的实验报告;
 - (5) 完成简单的设计性实验;
 - (6) 为后续课程——近代物理实验和各类专业实验做好必要的铺垫.
3. 培养科学精神,提高科学素养,逐步具备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,锲而不舍的探索欲望,团结协作的团队意识,遵守纪律、爱护公物和环境的优良品德.

物理实验的程序由课前预习、课内操作、课后作业(实验报告)三个环节组成.

一、预习

上课前应通读教材,以求对当次实验有个全面了解,然后按照指定的预习重点,精读有关数学模型,明确要测量的物理量,对主要仪器的功能及使用方法形成一个初步印象.

课前预习必须做书面预习报告,课上请老师审阅.无预习报告或预习报告不合格者不准上课.预习报告一般包含下列内容:

1. 实验名称和实验目的.
2. 实验原理.用简洁的语言、数学式或图示方式概括实验原理、实验条件,画好有关的框图、

结构图、电路图或光路图。

3. 仪器及操作要点.制表列出主要仪器的名称,留待课上填注编号、型号和规格;注明主要仪器的使用方法及操作禁忌,避免课上束手无策或损坏仪器;扼要拟定操作步骤,以备课上参阅。

4. 画出简单明了的数据表,以备课上填入测量数据及其单位。

上课时,预习报告必须带来.教师除检查书面报告外,还要提问并作记载,以便全面衡量预习质量。

优秀的科技工作者消化知识快,应变能力强,能够迅速掌握新的知识,及时将书本知识转化为工作本领.物理实验通过课前预习环节,逐步培养高效率的自学能力。

从同学拿到这本书的一刻算起,物理实验就已开课.请同学尽快预习第一章“测量不确定度的评定”,疑难之处要做简单的笔录,准备课上向老师提出.不确定度理论与评定方法贯彻国家有关法规,与国际科技界准确接轨,是新世纪大学生必备的知识技能。

二、上课

1. 提前五分钟进入实验室,按组号入座.教师讲解和指导时,提倡同学根据教师的口头讲述归纳笔记,圈注重点和疑问。

2. 多数仪器都比较贵重,有时还连接高压电源.要对自己和他人的安全负责,对国家财产负责,认真执行操作规程.如果在不了解仪器的情况下贸然动手,轻则仪器失调,给别人带来麻烦,重则造成事故.今后走进任何实验室,都不要擅自动手,这是进入实验室的基本素养之一。

3. 注意在细节上培养科学作风,如仪器布局合理整齐,操作姿势正确文明;电学仪器经教师检查后才能通电;不要触摸光学元件的工作表面;实验完毕及时断开电源,整理仪器并恢复到原来的陈列状态;主动请老师指导操作、检查数据、验收仪器。

科学实验是一种精细的手工劳动,更是一种复杂的脑力劳动,是理论与实践相结合的典型过程.要对实验现象十分敏感,准确判断,果断决策.出现故障应立即控制现场(如断电、降温等),报告老师,分析原因,排除故障,总结教训,逐步积累临场经验.严禁擅自调换别组的仪器;损坏和丢失仪器应按规定赔偿。

教师的指导和规则的约束,是完成教学的保障,但绝不意味着束缚学生的活力.学生既要勇于发问,又要有所见地;既要掌握规则,又要有所创新。

4. 记录数据要完整准确,实事求是.有些实验条件(如温度、仪器规格等)比较重要,但不一定参加运算,不要漏记。

实验数据不得随意改动,仅当确认测量有误时才能修改.先在原数据上轻轻地画一条横线,再把重新测到的数据工整地写在一旁,必要时应注明更改理由.不应重笔描画、涂抹黑块甚至撕扯挖补,这样既影响整洁,也失去了分析错误的依据.有时舍去的数据反而是正确的。

实验课绝不以“数据完美”评定成绩,切不可凭借主观意愿更改数据,更不允许抄袭、拼凑和伪造数据.只有依靠真实数据,才能看到事物的本来面貌.操作完毕应主动请教师审核实验记录并签字,不经教师签字的记录无效。

5. 学会与他人合作.同组同学既要合理分工,又要相互协调.动手能力强的同学不要包办代替,动手能力弱的同学要杜绝依赖和盲从;在课时充裕的情况下,同一实验可以交换分工,每人各自测量一套数据.每人都要有一份实验记录,注明合作者姓名。

6. 保持实验环境的安静整洁,不得在室内吸烟、吃零食、扔废纸、藏掖果皮、吐口香糖,大声喧

哗和随意走动.要爱护室内设施,主动做好卫生值日工作.

三、作业与考核

正规的科学技术实验都要撰写实验报告.实验报告是在实验记录的基础上充实归纳,整理出来的.实验记录应随实验报告一起交给教师,无实验记录的报告不予承认,不允许将实验记录充当实验报告.实验报告应在规定的时间内交上,晚交者酌情扣分,未交上次报告者不准做下次实验.报告应独立完成,雷同报告酌情扣分,直至记零分.

书写要使用统一的“实验报告纸”.报告包括下列内容:

1. 实验名称.
2. 抬头栏目.含班级、姓名、组别、合作者、实验日期等,这些都是教师的批改依据,不要空缺.
3. 实验目的.
4. 仪器和器材.包括主要仪器的名称、规格和编号.
5. 实验原理.说明有关物理效应如何具体应用于实验,包括数学模型的导出,简要的文字说明和必要的图形(装置图、框图、电路图、光路图等).
6. 实验步骤.主要是为保证实验条件和结果而采取的关键性步骤,一般不言自明的内容可略去不写.充分注意条理性、逻辑性和可操作性.
7. 数据处理.模仿或自行设计,画出简明合理的表格,把实验记录中的原始数据一一转抄过来.数据处理包括结果计算、不确定度评定和曲线图等内容.凡属计算,均应有文字公式、代入数据和计算结果等主要运算步骤.不要漏写单位.
8. 实验结果.包括测量结果的规范表示和观察现象、研究规律所得出的结论.
9. 讨论.对本实验的原理、方法、仪器、不确定度评定的进一步探讨或改进建议.要有具体分析,切忌泛泛空谈.有则写,无则免.

以上各项内容要详略得当,不同实验突出不同重点,不必拘泥格式,牵强附会拼凑条目.描述部分不应盲目抄袭教材,也不提倡长篇大论.要按照自己的理解,用自己的语言扼要阐述.报告书写要整洁美观,图文并茂.

每次发回实验报告,都要仔细阅读教师的批改意见,及时改错,主动争取教师补批.教师退回的不合格报告,应弄清问题,重写后连同原报告再交.

本课程的成绩由平时成绩和考试成绩合并评定,平时成绩参考课前预习效果、课内操作水平和课后报告质量给出.学生因正当理由缺课,应履行请假手续,事后要主动请求补课.无故缺课者不安排补课,该次成绩记零分.结课缺考或总成绩不及格者,由学校教务处另行安排.

第一章 测量不确定度的评定

§ 1.1 测量和有效数字

一、测量

物理实验通过观测物理量的大小和变化来研究物质结构和物体运动规律,因此测量是物理实验的主要内容之一.物理量,即[可测的]量([measurable] quantity),它是现象、物体或物质可定性区别和定量确定的属性.当我们讲到“长度、时间、质量、温度、电阻、物质的量、浓度”这些词语的时候,我们指的是一般意义(广义)的量;当我们讲到“某根棒的长度、某根导线的电阻、某份酒样中乙醇的浓度”的时候,我们指的是特定量(狭义).物理实验中所有的被测[的]量(measurand)和测量结果(result of a measurement),都是作为研究对象的特定量.所谓测量(measurement),就是以确定量值为目的的一组操作.所谓量值(value of a quantity),一般是由一个数乘以测量单位,来表示特定量的大小.例如 5.34 m 或 534 cm, 15 kg, 10 s, -40 °C, 它们都是有名量.像线应变、摩擦因数、马赫数、折射率、物质的量分数、质量分数这类量,其单位都是“1”,惯用名称叫做无量纲量,规范名称为量纲一的量(quantity of dimension one),表面上都是无量量,实际上它们都是两个有名量的比值.当我们讲到 X 射线的波长、电视信号的波长、超声声呐的波长时,我们指的是同种量.同种量是可以相互比较并按大小排序的量.若干同种量合在一起称为同类量,如波长、周长、厚度是同类量,功、热、能是另一组同类量.同类量可以使用相同的测量单位,但是可以使用相同单位的量不一定是同类量,例如:力矩和功都可用 $\text{N} \cdot \text{m}$ 作单位;压力和应力都可用 Pa 作单位;量纲为一的量单位都是 1;它们都不是同类量.同种或不同种、不同类的量都可以相乘除,组合成另一个量,例如长度乘以长度成为面积,路程除以时间成为速度;只有同种(一定条件下也可是同类)量才可以相加减,结果仍是一个同种(类)量.和大学物理课一样,量纲分析在物理实验课程中也是一个非常有用的工具.书写量和量的数值、单位时,要使用规范的字母、数字或汉字,参见 GB 3100—3102.初学者常常漏写单位,同学们要特别注意.

二、真值

实验中总是希望测量结果尽可能准确,甚至幻想获得绝对准确的真值.[量的]真值(true value[of a quantity])是与给定的特定量定义一致的值,只有通过完善的测量才有可能获得真值.量子效应排除了唯一真值的存在,真值按其本性是不确定的;与给定的特定量定义一致的值不一定只有一个.即使存在唯一确定的真值,用十进制数字来表示,它应当是一个无穷多位的数;实际测量中只能读出有限位数字,何况还存在其他类型的测量误差.由此可见,“完善的测量”和“真值”都属于“绝对真理”范畴.真值是不可能测量的,随着测量理论和测量技术的发展,测量结果会根据需要有限度地接近真值.在讨论问题的时候,真值是一个很有用的概念.实践中常把误差较

小,相对可靠的量值作为约定真值(conventional true value[of a quantity]),例如国际公布的相对原子质量等物理常量,标准物质(如砝码)的值,标准器证书上的值,某量重复性条件下多次测量的平均值等.

我国民间流传一则文言趣话,帮助人们轻松记忆圆周率 π 的前 23 位数字:山巅一寺,一壶酒;尔乐,苦煞吾,把酒吃.酒杀尔,杀不死,乐而乐.即 3.141 592 653 589 793 238 462 6. 1973 年,法国数学家 Jean Guilloud 和 Martine Bouyer 用计算机求出 π 的前一百万位,印成厚达 400 页、号称世界上最枯燥的一本书.这两个冗长的数字都不是 π 的真值,但都可以作为 π 的约定值.

三、有效数字

真值 q_0 是不可知的,对 q_0 的一切观测值 q_k 都是近似值,通常用十进制记数法表示.近似的特征,体现在数字的最末一两两位存在误差 Δq ,误差 Δq 的大小和正负不能准确确定.这样的近似数通常称为有效数(字).数学上定义有效数字(significant figure):从 q_k 左起第一位非零数字算起,如果误差的绝对值 $|\Delta q_k|$ 不超过第 s 位的半个单位,则 q_k 的前 s 位数字都叫做有效数字,第 s 位有效数字(发生误差的前一位)又叫做可疑数字.在计量学应用中,我们把定义中“不超过左起第 s 位的半个单位”,放宽到“不超过第 s 位的 1 个单位”.书写表达时,常常在有效数字后面写出 2 位不确定(有误差的)数字;作四则运算时,中间步骤的得数写出 2 位不确定数字.需要强调,近似数保留的 2 位不确定数字在计量过程中是有效的,不能认为可有可无而随意增减.带有不确定数字的近似数,习惯上仍被称作有效数(字).

四、仪器的估计读数

例 1 用钢直尺测量一条棒的长度 L 如图 1.1.1 所示,钢直尺的分度值为 $e_L = 1 \text{ mm}$.测量中要求量具的标尺总长(也叫量程 FS)大于被测量,尽量不用小量程分段接力“丈量”.从图 1.1.1 可准确读出十位为 $3-1=2$,个位为 $35-30=5$;用目测将 $35-36$ 两刻线的间隔等分成 10 份,棒的右端大约在 6 份的位置上.测量结果为 3 位有效数字, $L=25.6 \text{ mm}$.例 1 中的十分位读数 6 叫做估计读数.估计读数只有一位,它是近似值中的不确定数字,误差就发生在这一位上.至于误差究竟有多大,在以后的章节里学习它的估算方法,但绝不能理解为误差等于 0.6 mm .本例被测棒左端对齐 10 mm 而不是 0 mm ,一来避免对偏,二来避免总是使用标尺的同一工作段.

长度测量是一切测量的基础,直尺刻度是一切仪器刻度的原型.估计读数的方法要视标尺类型灵活掌握.像钢直尺、千分尺等仪器标尺刻度是十进制的,按照例 1 的方法估读;如图 1.1.2 所示(上图)天平横梁的分度值为 $e_m = 0.5 \text{ g}$,是五进制的,应将最小格分成 5 份来估读;图 1.1.2(上图)的分度值为 $e_m = 0.02 \text{ g}$,是二进制的,应将最小格分成 2 份来估读,即游码左缘靠近刻度线

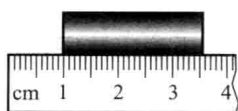


图 1.1.1 估计读数

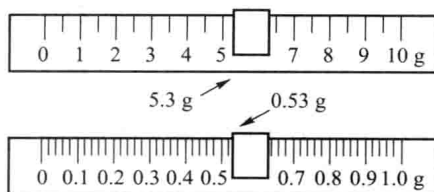


图 1.1.2 非十进制标尺估计读数

读偶数,靠近半格读奇数,所谓“靠近”,包括稍欠和稍超.电学仪表也有类似情况.游标卡尺、机械秒表等量具不必估读,其读数的末位虽然表示整格数,但也是不确定数字.今后使用每种仪器,都要弄清它的量程 FS、分度值 e 并作记录,学会正确估读.当然在日常生活中,测量一般是不进行估读的.

五、数值修约规则

数字尾数的舍入叫修约.熟知的“四舍五入”规则使 1—9 九个数字进位的机会偏大,这在数理统计中是不合理的.现在通用的修约规则如下:拟舍弃的尾数大于 5 则进 1,小于 5 不进;等于 5 时,则当保留部分的末位是奇数时进 1,保留的末位是偶数时不进,简单概括为“四舍六入五凑偶”.下面的例题暂用上加横线标出不确定数字,以便于识别.

例 2 将下列近似值保留 2 位不确定数字: $\overline{1.535}$, $\overline{12.405}$, $\overline{120.5}$.

解 $\overline{1.535} = \overline{1.54}$, $\overline{12.405} = \overline{12.40}$, $\overline{120.5} = \overline{120}$

丁尼生勋爵的新诗中有这样的名句:转瞬有一人逝去/转瞬有一人降生.他很快收到了有精确癖的数学家巴贝奇的来信:如果真是这样,人口便不再增长了,建议改写如下:转瞬有一人逝去/转瞬有一又十六分之一人降生.可见数学家的逻辑远比常人严格.

六、科学记数法

例 3 正确书写下列量值:

$R_{\text{地}} = 6\ 378\ \overline{170}\text{m}$, $e = 0.000\ 000\ 000\ 000\ 000\ 000\ 160\ 217\ \overline{733}\ \text{C}$

解 $R_{\text{地}} = 6.378\ \overline{170} \times 10^6\ \text{m}$, $e = 1.602\ 177\ \overline{33} \times 10^{-19}\ \text{C}$

例 3 的形式叫做科学记数法,10 的幂表示数量级.要正确选择数量级指数,使量值在形式上有且只有一位非零整数,或者说首数大于等于 1,小于 10.科学记数法既能使很大或很小的量值书写简洁方便,又能正确表示它的有效数字.注意:单位变换及用科学记数法时,有效数字个数不能随意增减.

七、近似计算

处理实验数据要遵守近似数运算的修约规则.下面的例题暂用上加横线标出不确定数字,以便看清它们在运算过程中的走向.

1. 加减法

例 4 (1) $\overline{96.4} + \overline{8.85}$ (2) $\overline{45.35} - \overline{36.8}$

解 (1) $\overline{96.4} + \overline{8.85} = \overline{105.25}$ (2) $\overline{45.35} - \overline{36.8} = \overline{8.55}$

$$\begin{array}{r} \overline{96.4} \\ + \quad \overline{8.85} \\ \hline \overline{105.25} \end{array} \qquad \begin{array}{r} \overline{45.35} \\ - \quad \overline{36.8} \\ \hline \overline{8.55} \end{array}$$

分位运算中,同一位上有不确定数字时,其和、差在本位仍是不确定数字,进位和借位不是不确定数字.由例 4 可以归纳出:

规则 1 和差的不确定数字起始位置,与相加减的几个数中不确定数字最靠前的相同.

例 4 中(1)小题的和不不确定数字起始位置与 $\overline{96.4}$ 相同,第一个不确定数字在十分位;例 4

中(2)小题的差的不确定数字起始位置与 $36.\bar{8}$ 相同,第一个不确定数字在十分位.运算结果暂且保留 2 位不确定数字,以便该结果在参加以后的运算时不致带去太大的修约误差.

下例说明修约误差的单向积累效应.

例 5 某班一次考试成绩分布如下:100—90 分 2 人,89—80 分 9 人,79—70 分 16 人,69—60 分 6 人,60 分以下 2 人,求各档百分比,并验算.

解 $2+9+16+6+2=35$ 人

$$2 \div 35 = 6\%$$

$$9 \div 35 = 26\%$$

$$16 \div 35 = 46\%$$

$$6 \div 35 = 17\%$$

$$2 \div 35 = 6\%$$

验算: $(6+26+46+17+6)\% = 101\%$,修约误差出现较大的单向积累,得出不合常理的结果.下边令各百分数多保留一位尾数,得

$$2 \div 35 = 5.7\%$$

$$9 \div 35 = 25.7\%$$

$$16 \div 35 = 45.7\%$$

$$6 \div 35 = 17.1\%$$

$$2 \div 35 = 5.7\%$$

验算: $(5.7+25.7+45.7+17.1+5.7)\% = 99.9\%$ 修约误差的单向积累减小,计算结果趋于合理.

2. 乘除法

例 6 (1) 5.348×2.05 (2) $18.1764 \div 1.02$

解 (1) $5.348 \times 2.05 = 10.9\bar{6}$ (2) $18.1764 \div 1.02 = 17.8\bar{2}$

$$\begin{array}{r} 5.34\bar{8} \\ \times 2.0\bar{5} \\ \hline 2674\bar{0} \\ 1069\bar{6} \\ \hline 109634\bar{0} \end{array}$$

$$\begin{array}{r} 17.8\bar{2}0 \\ 1.02 \overline{) 18.1764} \\ \underline{102} \\ 797 \\ \underline{714} \\ 886 \\ \underline{816} \\ 204 \\ \underline{204} \\ 0 \end{array}$$

分位运算中,有不确定数字参与乘除的,得数(包括乘法的进位)都是不确定数字.考察上例中各数的确定数字,例 6(1)题 3 位乘以 2 位,结果得 2 位;例 6(2)题 5 位除以 2 位,结果得 2 位.由此可以归纳出:

规则 2 积商的确定数字位数,与相乘除的各数中确定数字最少的相同.由于乘方是乘法运算的一种,开方和取对数都是它的逆运算,所以有

规则 3 乘方和开方的确定数字与原数相同.例如

$$(1) 29.\bar{4}^2 = 864.\bar{4} \quad (2) \sqrt{36.8\bar{7}} = 6.07\bar{2}1$$

规则 4 对数的小数与真数的确定数字位数相同.例如

$$(1) \lg 6.80\bar{5} = 0.8328\bar{3}, (2) \lg 68.0\bar{5} = 1.8328\bar{3}$$

其他函数运算的定位规则可以类推,例如

$$(1) \sin 1.0\bar{3} = 0.857\bar{3} \quad (2) \arctan 5.77\bar{2} = 1.399\bar{2}5$$

在今后的近似计算中,可以直接引用以上各条规则.各例题的结果都保留了 2 位不确定数字,留待实验数据的全部计算结束之后,再按有关规则修约到最多两位不确定数字.在用计算器连续运算时,机内保留位数很多,发生的修约误差极小;算出结果后位数仍然很多,书写结果时仿照例 4、例 6 和规则 3 中各例,修约到只保留 2 位不确定数字,留待下一步处理.

八、物理曲线图

在物理实验中,常为了清晰地看到物理量之间的定性关系,或方便地比较不同物理特性,需要用图解法来直观地显示物理量之间的关系,有时作直线拟合,有时还要作曲线图,作图法是研究物理量之间变化规律的重要手段,对于作图一般应遵守如下规则(如图 1.1.3 所示):

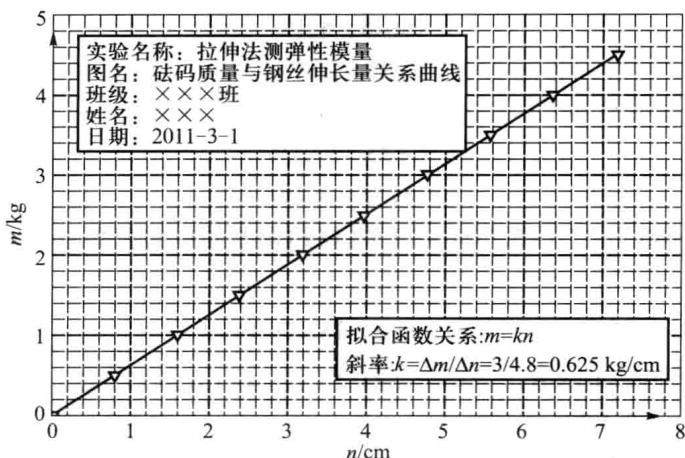


图 1.1.3 拉伸法测弹性模量实验砝码质量与钢丝伸长量关系曲线

1. 作图用纸一般应采用标准坐标纸,图纸的大小应能反映物理量的有效数字;作图区域应占图纸的一半以上.

2. 取自变量为横坐标(向右增大);取因变量为纵坐标(向上增大).画出纵、横坐标轴,并与图纸上印的线条密切重合,但坐标轴不一定取图纸所印表格的边线,坐标轴的标度值不一定从零开始.

3. 根据自变量(及因变量)的最小值与最大值,选取合适的作图比例,应取图纸上的 1 格所表示的原数据的量值变化为 1、2、5 等数(或它们的十进倍率).

4. 每隔相同距离,沿轴画一垂直于轴的短线(称为标度线),并在其附近注以标度值,标度值的位数不必取实验数据中的全部有效数字位数,例如 2.50 只标 2.5 即可.(一般在各坐标轴上可标 5—10 个标度值.)

5. 对每一坐标轴,要标明物理量的名称及单位符号.(标注的方法与表格相同.)

6. 数据点要用端正的“+”或“△”等符号来表示.数据点应在符号的中心,符号的大小应相当

于不确定度的大小;但为简单起见,也可统一取 2~3 mm.在一张图纸上作多条曲线时,不同的数据组应使用不同的符号来表示数据点,并在图中适当位置说明不同符号的不同意义.求斜率时取点的符号应采用有别于这些数据点的符号,例如用正三角形“ Δ ”,并在其旁标以坐标(坐标值应正确写出有效数字);求斜率时所取点的位置应靠近直线的两端,为计算方便起见,可选取横坐标为整数.

7. 拟合直线或曲线的线条务必匀、细、光滑.不通过图线的数据点应匀称地分布在图线的两侧,且尽量靠近图线.

8. 在实验报告的图纸中,应写上实验名称、图名、姓名、日期、图纸上的中英文字及数字等均需写端正.

以上是针对用手工作图的.当然也可以借助计算机作图,则有些规则(如数据点在符号的中心,线条匀、细、光滑,书写端正等)是自动满足的.虽然计算机可以任意取比例,使曲线(或直线)充满图纸,但实验作图时不宜采用这种方法,两标度线间的量值变化仍应取 1、2、5 及其十进倍率为佳,因为只有这样,才易于使用者读图.

§ 1.2 误差初步知识

一、误差

被测[的]量 Q 的真值 q_0 是不可知的,对 Q 的所有观测值 q_k 都是 q_0 的估计[值],而 q_0 是所有 q_k 的期望[值].我们把估计值与真值之差 Δq_k 叫做[测量]误差:

$$\Delta q_k = q_k - q_0 \quad (1.2.1)$$

误差 Δq_k 一般都发生在估计值 q_k 的最末 1、2 位不确定数字上.

[测量]误差(error [of measurement])等于测量结果减去被测[的]量的真值. Δq_k 有正有负,与被测量 Q 属于同种量,书写中不要遗漏单位.为了便于比较,有时把 Δq_k 换算成相对误差 $\Delta_r q_k$,定义相对误差(relative error)等于测量误差除以被测量的真值,即

$$\Delta_r q_k = \Delta q_k / q_0 \quad (1.2.2)$$

$\Delta_r q_k$ 是量纲一的量,一般写成百分数或数量级形式,书写时不要误加单位.当有必要区分 $\Delta_r q_k$ 和 Δq_k 的称谓时,把 Δq_k 叫做绝对误差(absolute error),“绝对”只是为了区分“相对”,不要误解为误差的绝对值.

需要强调,由于真值不能确定,(1.2.1)式、(1.2.2)式两式中的 q_0 在实践中都采用约定真值,由此求出的绝对误差、相对误差都是估计值,即误差本身也存在误差.由于 $\Delta_r q_k$ 能直观反映 Δq_k 所占测量结果的份额比例,从而赋予不同测量结果以直观可比性.

例 7 测量书本的长度 $l = 25.72$ cm,误差约 0.05 cm;测量跑道的长度 $L = 100.12$ m,误差约 10 cm.哪个结果较准确?

解 虽然 ΔL 是 Δl 的 200 倍,并不说明书本的测量误差小.

$$\Delta_r l = \Delta l / l = 0.05 \text{ cm} / 25.72 \text{ cm} = 1.9 \times 10^{-3} = 0.19\%$$

$$\Delta_r L = \Delta L / L = 0.10 \text{ m} / 100.12 \text{ m} = 1.0 \times 10^{-3} = 0.10\%$$

因为 $\Delta_r L < \Delta_r l$,所以跑道的测量结果较准确.

二、误差分类

生活中不会反复度量同一个量值;科学实验常常在重复性条件或复现性条件下多次测量同一被测量.定义重复性条件(repeatability conditions)包括:相同测量程序;相同观测者;在相同条件下使用相同的测量仪器;相同地点;在短时期内重复测量.

一般情况下,重复测量次数 n 为 4 到 20;讨论理想概念的时候,常假定 $n \rightarrow \infty$.由于实验条件不能保持绝对恒定,重复观测值会在真值附近随机摆动,因此被测量 Q 就是一个服从某种概率分布的随机变量,很多被测量服从正态分布.每个观测值 q_k 都是对变量 Q 的一次特定取值,都是估计值. n 个 q_k 不尽相同,组成一个观测列或称测量列 $q_k (k=1, 2, \dots, n)$,它就是取自 Q 的一个随机样本;样本容量为 n .处理实验数据首先求样本均值

$$\bar{q}' = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n q_k \quad (1.2.3)$$

当 $n \rightarrow \infty$ 时,样本 $q_k (k=1, 2, \dots, \infty)$,无所遗漏地包含了 Q 的各种可能取值,称为变量 Q 的总体;此时按(1.2.3)式求出的均值叫总体均值,记作 μ_q , μ_q 是 \bar{q}' 的期望, \bar{q}' 是 μ_q 的估计,表示为

$$\langle \bar{q}' \rangle = \mu_q \quad (1.2.4)$$

符号 $\langle \rangle$ 表示统计平均.注意 μ_q 还不是 Q 的真值.

重复测量在某种意义上像实弹打靶,如图 1.2.1 所示.靶心 q_0 是被测量 Q 的真值,枪械是测量仪器,靶牌是变量 Q 的二维坐标系和数据记录纸,对 q_0 瞄准击发的每个弹着点 q_k 都是一个独立观测值.理想结果是 n 发子弹都穿进靶心 q_0 ,实际上 q_k 随机分布在偏离靶心的某个区域,呈外疏内密的分散图样.在靶图上方,投影画出弹着点密度曲线.当 n 有限时,曲线为台阶形直方图;当 $n \rightarrow \infty$ 时,直方成为光滑连续的单峰对称曲线.密度曲线定量描述了弹着点外疏内密的分布特征.用(1.2.3)式求平均值,相当于在图上标出弹着点分布图样的几何中心(也就是密度曲线的重心) \bar{q}' ,当 $n \rightarrow \infty$ 时, $\bar{q}' \rightarrow \mu_q$, μ_q 与真值 q_0 之间有一确定的距离 ε_q .

系统误差(systematic error):在重复性条件下,对同一被测量进行无限多次测量所得结果的平均值与被测量的真值之差.系统误差 ε_q 在靶图上就是弹着点中心 μ_q 到靶心 q_0 的距离

$$\varepsilon_q = \mu_q - q_0 \quad (1.2.5)$$

随机误差(random error):测量结果与在重复性条件下对同一被测量进行无限多次测量所得结果的平均值之差.随机误差 $\delta(q_k)$ 在靶图上就是各弹着点 q_k 到其中心 μ_q 的距离

$$\delta(q_k) = q_k - \mu_q \quad (1.2.6)$$

由此可见,每个 q_k 的随机误差不尽相同, n 个 q_k 却拥有相同的系统误差.实际上,误差可以表示为

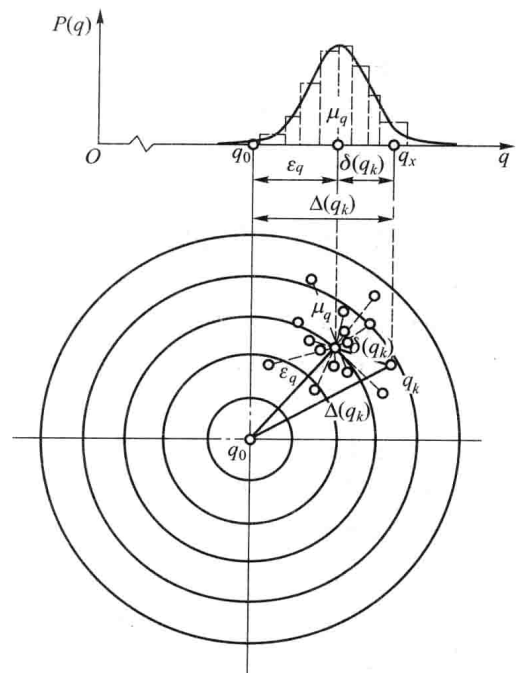


图 1.2.1 误差靶图

$$\text{误差} = \text{测量值} - \text{真值} = (\text{测量值} - \text{总体均值}) + (\text{总体均值} - \text{真值}) \quad (1.2.7)$$

$$\Delta(q_k) = q_k - q_0 = (q_k - \mu_q) + (\mu_q - q_0) = \delta(q_k) + \varepsilon_q \quad (1.2.8)$$

即任何一个误差都可以表示为随机误差和系统误差的代数和,如图 1.2.1 中密度曲线横轴所示.由于靶图是二维的, $\Delta(q_k)$ 、 $\delta(q_k)$ 、 ε_q 构成矢量三角形,(1.2.8)式变为矢量式 $\Delta(\mathbf{q}_k) = \delta(\mathbf{q}_k) + \varepsilon_q$,应当不影响概念的理解.

在实践中,由于 μ_q 和 q_0 不能确定,只能用其约定真值求出 $\hat{\Delta}(q_k)$ 、 $\hat{\delta}(q_k)$ 和 $\hat{\varepsilon}_q$ 等估计值,符号 $\hat{\quad}$ 表示估计.

三、误差来源与性质

测量值存在误差的原因可能有以下三方面:测量仪器(及标准量)的问题、测量方法的问题、测量者的问题,现分述如下

1. 测量仪器及标准量的问题

在许多情况下,测量仪器上刻度(或数字显示)就代表了标准值,如米尺、温度计等.但是这种“标准量”也并非真正标准,它与真正的标准必有差距.例如,米尺边缘会磨损,刻度有不均匀性或不够准确,在不同温度下米尺本身的长度有变化等.

2. 测量方法的问题

采用不同的测量方法可能会得到不同的测量结果,其影响是很明显的.例如,为了测量一块玻璃板的温度,用一般的温度计测量和用激光测量,其结果就往往不一样;为了测量重力加速度,用测单摆周期的方法或用自由落体的方法结果也可能会不同.

3. 测量者的问题

这方面的问题很多.首先是“估读”的不同,待测量位于标量的某两刻度之间时,必须估读其数值,不同测量者的估读会有不同;这与测量者的位置、熟练程度及仪器所处的环境状况等有关.其次是“判断”的不同,例如,要测量干涉条纹间的距离,为确定何处是干涉条纹的中心位置(即光最亮处或最暗处),需要经验和判断能力.最后还有“误读”的可能,即测量者长期工作中难免犯错误,把数据读错也是很可能发生的.

以上三方面的问题都会造成误差.其中第一个问题和第三个问题产生的误差大小与测量仪器、测量者、测量条件和测量次数有关,可以用一定的方法进行评定(第三个问题中的“误读”除外),这种评定的方法将在第二节中详述.测量方法的问题则要进行定性分析以尽量避免或进行定量分析予以修正.

例如,用单摆测量重力加速度的一般公式为

$$g = 4\pi^2 \frac{L}{T^2} \quad (1.2.9)$$

式中 T 为单摆周期, L 为摆长,这里忽略了单摆摆线的质量,忽略了单摆运动是非简谐运动,也忽略了空气阻力的影响等,如果修正上述这些因素造成的误差,则要进行严格的计算和修正.如摆线质量为 m_μ ,摆球半径为 r ,摆球质量为 m ,则上述公式应修正为

$$g = 4\pi^2 \frac{L}{T^2} \left(1 + \frac{2r^2}{5L^2} - \frac{1}{6} \frac{m_\mu}{m} \right) \quad (1.2.10)$$