

高等学校物理实验教学示范中心系列教材

# 大学物理基础实验

主编 柴成钢 谭佐军 陈建军 副主编 丁孺牛 魏薇 后德家 王贤锋

 高等教育出版社  
HIGHER EDUCATION PRESS

014032271

04-33  
639

高等学校物理实验教学示范中心系列教材

# 大学物理基础实验

DAXUE WULI JICHU SHIYAN

主编 柴成钢 谭佐军 陈建军  
副主编 丁孺牛 魏薇 后德家 王贤锋



高等教育出版社·北京  
HIGHER EDUCATION PRESS · BEIJING



北航

C1720519

04-33

639

175530310

### 内容提要

本书结合高等学校农林类专业的特点, 简明扼要、深入浅出地阐明了有关大学物理基础实验的原理与方法。在内容安排上, 结合长期实验教学的经验和体会, 通过优化整合, 全面系统、由浅入深地安排了多个实验, 包括力学、热学、电磁学、光学、近代物理以及若干涉及物理学新进展和新技术的实验。全书分为基础物理实验、综合物理实验和设计物理实验三篇。

本书可作为高等学校非物理类专业, 特别是农林类专业的大学物理实验课程的教材, 也可供科技工作者参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

大学物理基础实验 / 柴成钢, 谭佐军, 陈建军主编.

--北京: 高等教育出版社, 2014. 2

ISBN 978-7-04-039064-3

I. ①大… II. ①柴… ②谭… ③陈… 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 (2013) 第 300547 号

策划编辑 郭亚嫒 责任编辑 郭亚嫒 封面设计 王 睢 版式设计 于 婕  
插图绘制 尹 莉 责任校对 刘娟娟 责任印制 毛斯璐

出版发行	高等教育出版社	咨询电话	400-810-0598
社 址	北京市西城区德外大街 4 号	网 址	<a href="http://www.hep.edu.cn">http://www.hep.edu.cn</a>
邮政编码	100120		<a href="http://www.hep.com.cn">http://www.hep.com.cn</a>
印 刷	国防工业出版社印刷厂	网上订购	<a href="http://www.landaco.com">http://www.landaco.com</a>
开 本	787 mm × 1092 mm 1/16		<a href="http://www.landaco.com.cn">http://www.landaco.com.cn</a>
印 张	13	版 次	2014 年 2 月第 1 版
字 数	320 千字	印 次	2014 年 2 月第 1 次印刷
购书热线	010-58581118	定 价	21.00 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 39064-00



# 前 言

传统的基础物理实验教学在训练学生基本操作技能方面已取得长足进步，而在培养学生科学实验能力，提高学生科学研究素养方面仍存在不足。具体体现在：①传统的物理实验教学中测量某一物理量或研究某个物理规律都局限于某一种方法或原理，即使有不同的原理或方法也以不同的物理实验形式出现，缺乏系统性，学生获得的知识是支离破碎的；②每个实验从实验目的、实验原理和方法、实验内容、实验仪器、实验步骤到数据记录表格和数据处理方法一应俱全，使学生思维未得到应有的训练。

为了全面培养学生的基本素质、创新精神和初步的科学研究能力，我们系统地研究了物理实验教学，并结合长期物理实验教学的经验和体会，把测量物理量相同的、测量工具相似的以及测量技术或方法一致的物理实验优化整合在一起，淡化实验步骤和数据记录表格。本书有以下一些特点。

1. 强调物理实验教学中的组合原则。任何科学研究的实验都是建立在组合不同工具、运用不同的原理和方法的基础上来进行的，物理实验更是如此。物理实验是通过有效地组合不同实验仪器来完成物理量的测量或物理规律的研究。因此，培养学生正确地选择实验仪器进行物理实验是本书的目的之一。

2. 避免简单重复。如在固体密度、表面张力和黏度等实验中，尽管要间接测量的物理量不相同，实验原理也不同，但是这些实验基本都是运用长度、时间、质量和温度等基本物理量的测量工具进行组合实验。优化整合前，学生需要分别去完成这些实验，而做这些实验又等于简单重复地使用力学和热学等基本物理量的测量工具。优化整合后，学生可以选做上面任何一个实验，达到基本训练的目的。

3. 强调物理原理。如磁场的测量，可以用感应线圈来测量，也可以用霍耳效应原理来测量，还可以用磁光效应原理来测量等。实际上测量磁场的方法很多，对于不同的精度和不同的应用领域，测量磁场的方法不一样。调整前，测量磁场和研究磁性材料特性的实验分散在各个实验中，不利于学生系统地掌握磁场的测量原理。调整后，把测量磁场和研究磁性材料特性的实验整合在一起，有利于学生系统掌握测磁技术，更有助于学生归纳概括出“测磁原理就是利用磁场的特性”这个核心知识点。

4. 层次分明。一方面，我们把整个实验分成三个层次，即基础层次、综合层次和设计性层次；另一方面，在这三个层次上，我们注意前后内容的衔接。如光学实验，在基础层次上，我们安排了光学仪器（如分光计和迈克耳孙干涉仪）的调节与使用。在综合层次上，有上面的光学仪器的运用，如光谱分析、测量折射率和全息摄影等。在设计层次上，我们安排了组装迈克耳孙干涉仪的实验。

5. 扩大自主性，为学生创新提供平台。在每个层次上提供学生自由选择实验的空间；同



时，通过实验比较和仪器组合为学生创新设计提供舞台。

6. 提供大量预习思考题和练习题。预习思考题要求学生系统了解和掌握用不同测量的方法测量同一物理量的优缺点和应用领域等。而练习题则是针对具体实验中从原理、方法和仪器的使用到注意事项等一些重要而又容易疏忽的细节而设计的，学生可以通过练习题来检查实验的效果。同时，部分预习思考题和练习题还涉及不同的专业特点。

在使用本教材时，要在选择实验之前，通读每一章的综述，并通过练习题检查自己掌握了多少。然后，选择一个实验，一般而言，完成一个实验中的任务可以有多个实验原理和方法，了解这些原理和方法的相同点和不同点，以及这些方法的适用条件和测量精度等，比较之后，确定一个实验方法。在方法确定后，则要弄清该方法需要哪些测量仪器和设备，了解这些仪器和设备的使用方法与注意事项等。所有这些是在教材上可以找到的。除此之外，实验步骤、数据记录表格与数据处理流程，则需要同学们自己拟订。

做好物理实验，预习是关键，使用本教材则更是如此。预习要做到心中有数，知道本实验要做什么，为了完成该实验任务，需要测量哪些实验数据，需要哪些实验仪器和设备，实验仪器和设备该如何使用。设计好实验步骤和数据记录表格也是预习中应该重点解决的问题。

另外，还有少量的仪器设备，如单光子计数器、组合多功能光栅光谱仪等，可供学生进行科学研究之用，鼓励学生创新设计。同时，也鼓励学生提出具有一定创意的设计性实验，也可以对某一任务进行多种实验方法的比较研究。

本书是在华中农业大学使用的大学物理实验讲义的基础上改编而成的，参与编写和修订的同志为：魏薇（绪论、第七章），谭佐军（第九、十一和十二章），丁儒牛（第三、十章），陈建军（第六章），柴成钢（第一、二、四和八章），后德家（第十二章），王贤锋（第五章），另外王贤锋老师绘制了许多插图。

应用物理系的很多老师参与了本教材的编写和实验室的建设工作，在此不一一列举，谨致以衷心的感谢！

编写一本新体系的教材，是一项艰苦而又复杂的任务，须进行不断的改革实践和长期的研究探索才能日臻完善。由于编者水平有限，时间紧迫，难免有错误和疏漏之处，热切希望读者批评指正。

编者

2013年8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



北航

C1720519

19201

# 目 录

07	实验 19.2 电表的内阻和校正	3.2 第 69 页
18	实验 19.3 导体系数的测定	3.2 第 70 页
28	实验 19.4 磁滞现象测量	第 6 章
10	实验 19.5 激光电池的特性研究	1.0 第 72 页
32	实验 19.6 测量铂电阻感温系数	4.0 第 73 页
40	实验 19.7 恒流源电路设计	4.0 第 74 页
40	实验 19.8 数字成像处理技术测光通量	4.0 第 75 页
绪论		1
<b>第一篇 基础物理实验</b>		
第一章	力和热学基本量的测量	21
实验 1.1	密度测量	26
实验 1.2	毛细管法测液体黏度	27
实验 1.3	落球法测液体黏度	28
实验 1.4	比较法测液体黏度	28
实验 1.5	气体比热容比的测定	29
第二章	电学基本量的测量	33
实验 2.1	万用表的使用	37
实验 2.2	示波器的使用	39
实验 2.3	惠斯通电桥测量电阻	44
第三章	光学仪器的调节与使用	51
实验 3.1	迈克耳孙干涉仪的调节与使用	51
实验 3.2	分光计的调节	53
<b>第二篇 综合物理实验</b>		
第四章	刚体材料的力学性质初步研究	61
实验 4.1	钢丝杨氏模量的测量	62
实验 4.2	金属棒杨氏模量的测量	64
实验 4.3	刚体转动惯量的测量	67
实验 4.4	扭摆法测量物体转动惯量	69
第五章	基本元件构成的电路特性研究	71
实验 5.1	分压电路	71
实验 5.2	限流电路	73
实验 5.3	二极管的伏安特性	75
实验 5.4	RC 电路的暂态过程	76
实验 5.5	RL 电路的暂态过程	78



实验 5.6	电子积分器测电容	79
实验 5.7	电路故障的分析诊断	81
第六章	传感器	86
实验 6.1	热电转换技术——温差电偶定标	91
实验 6.2	霍耳式传感器特性研究	92
实验 6.3	传感器的计算机接口技术——温度传感器	94
实验 6.4	传感器的应用实验——温度报警器的制作	96
第七章	磁场测量及铁磁材料特性研究	99
实验 7.1	用霍耳元件测螺线管轴向磁感应强度 $B$	102
实验 7.2	研究亥姆霍兹线圈的轴线上及周围的磁场分布	105
实验 7.3	用冲击电流计测铁磁物质的磁化曲线	108
实验 7.4	用示波器观察动态磁滞回线并测量铁磁物质的居里点	112
第八章	声速的测定	114
实验 8.1	振幅极值法(共振干涉法)测声速	115
实验 8.2	相位比较法测声速	116
实验 8.3	时差法测声速	117
第九章	光的偏振	121
实验 9.1	偏振光特性的研究	123
实验 9.2	椭圆偏振光的实验	124
实验 9.3	偏振光特性的应用	126
第十章	介质折射率的测量	128
实验 10.1	用分光计测介质折射率	128
实验 10.2	用牛顿环测气体折射率	130
实验 10.3	迈克耳孙干涉仪测介质膜的折射率	132
第十一章	光谱分析技术基础	136
实验 11.1	平行狭缝光栅测氢灯的波长	141
实验 11.2	利用三棱镜测氢灯的波长	143
实验 11.3	利用光纤光谱仪测植物反射光谱	144
实验 11.4	利用 X 射线荧光光谱测土壤中的重金属含量	146
第十二章	近代物理实验专题	149
实验 12.1	漫反射全息摄影	149
实验 12.2	弗兰克-赫兹实验	155
实验 12.3	声光效应实验	159
<b>第三篇 设计性物理实验</b>		
第十三章	设计性实验	165
实验 13.1	测电源电动势	168

实验 13.2 电表的改装和校正 .....	169
实验 13.3 导热系数的测定 .....	170
实验 13.4 薄膜厚度测量 .....	171
实验 13.5 硅光电池的特性研究 .....	172
实验 13.6 测量钠光双线波长差 .....	173
实验 13.7 组装迈克耳孙干涉仪 .....	174
实验 13.8 数字成像处理技术测光栅常量 .....	175

## 附 录

附录一 长度测量 .....	183
附录二 时间和频率测量 .....	184
附录三 质量测量 .....	185
附录四 温度测量 .....	186
附录五 压力测量 .....	188
附录六 直流电流测量 .....	189
附录七 直流电压测量 .....	191
附录八 直流磁感应强度的测量方法简介 .....	192
附录九 常用光源 .....	194
附录十 物理学常量表 .....	195
附录十一 液体的表面张力系数 .....	196
附录十二 常用光源的谱线波长表 .....	197
附录十三 液体黏度 .....	197

主要参考文献 .....	199
--------------	-----

### 1. 自学能力

通过阅读实验教材和相关参考资料,完成预习报告,做好实验准备,借助教材或仪器说明书正确使用实验仪器,从而培养自学能力。

### 2. 动手能力

能够借助实验教材和教师指导,独立完成整个实验过程;正确操作实验仪器,有效观察实验现象,初步进行实验数据测量。

### 3. 分析判断和表达能力

运用物理学理论对实验现象进行初步的分析判断;能合理设计实验表格,正确记录处理实验数据,绘制数据曲线,说明实验结论;对整个实验进行有效地表述,科学撰写实验报告。

### 4. 解决问题能力

对于相对简单的问题,能够从研究对象和课题要求入手,查阅相关资料,确定实验方案,设计实验步骤,根据精度要求确定实验参数,选配实验仪器,最终解决问题。对于实验中意想不到的问题,虽然可能不是实验研究对象,但也是提高分析问题,解决问题能力的机会。

## 绪 论

物理学是一门实验科学，物理理论来源于物理实验，又必须最终由物理实验来检验。发现物理现象，寻找物理规律，建立物理理论，都离不开物理实验这一关键环节。在物理学的产生、发展和应用过程中，物理实验具有举足轻重的作用。

对理、工、农等专业开设物理实验课程，可以让学生观察实验现象，用科学的实验方法验证或解释物理学的规律，设计或发现解决物理问题的方法，并得到实践；让学生学习科学的实验方法，培养技能，锻炼能力，从而提高自身科学素养。

### 一、物理实验的重要作用

物理实验是一门实践性课程，学生通过设计实验步骤，观察分析实验现象，测量、记录、处理实验数据，得到实验结论，从而独立完成整个实验过程。实验过程能充分调动主动性，激发创造性，培养严谨的科学作风。

#### (一) 学习科学的实验方法

通过对实验现象的观察、分析和对物理量的测量，学习物理实验的基本知识、基本方法和基本技术；加深对物理理论知识的理解；学习常用实验仪器的使用方法；掌握物理实验的基本设计思想，并学会运用理论去解决实际物理问题。

#### (二) 培养技能，锻炼能力

##### 1. 自学能力

通过阅读实验教材和相关参考资料，完成预习报告、做好实验准备，借助教材或仪器说明书正确使用实验仪器，从而培养自学能力。

##### 2. 动手能力

能够借助实验教材和教师指导，独立完成整个实验过程；正确操作实验仪器，有效观察实验现象、科学进行实验数据测量。

##### 3. 分析判断和表达能力

运用物理学理论对实验现象进行初步的分析判断；能合理设计实验表格，正确记录处理实验数据，绘制数据曲线，说明实验结论；对整个实验进行有效地表述，科学撰写实验报告。

##### 4. 解决问题能力

对于相对简单的问题，能够从研究对象和课题要求入手，查阅相关资料、确定实验方案、设计实验步骤，根据精度要求确定实验参数、选配实验仪器，最终解决问题。对于实验中意想不到的问题，虽然可能不是实验研究对象，但也是提高分析问题、解决问题能力的好机会。



### (三) 提高科学素养

通过整个实验过程的科学训练,培养学生实事求是、严谨求实的工作作风,勇于探索、不断创新的科学精神,以及团结协作、爱护公务、遵守纪律的优良品德。

## 二、物理实验的重要环节

### (一) 实验预习

预习是上好实验课的基础和前提。实验前认真阅读实验教材和相关资料,明确实验目的,掌握实验原理、实验方法和条件,设计实验步骤,拟好数据记录表格。通过预习,对实验项目有一个整体理解,并完成引导实验的学习问题。预习思考题是针对实验项目特点给出的实验关键核心问题,完成问题有利于对实验的深入理解和全面把握。

### (二) 实验操作

实验操作是实验课的核心环节。根据预习实验所了解的实验内容和要求、仪器使用方法和注意事项进行实验操作。操作中要胆大心细,一丝不苟,严格按照仪器设备使用说明正确操作。实验中要善于观察,勤于分析,若发现异常现象或仪器故障,应立即停止实验,排除故障后方可进行实验。实验中如有疑问,可向指导教师询问。

实验记录是实验操作的重要组成部分,它应真实反映实验过程。在实验报告册的原始数据记录表中,对实验条件(包括温度、湿度等)、实验人员、实验现象和实验原始数据进行及时记录。记录要科学、清晰、详尽,特别要注意的是测量数据的有效数字的科学处理,以及物理测量量单位的标明。实验数据的更改,要科学严谨,需注明原因,以便在实验结束后分析、核对。客观对待实验数据,严禁伪造、篡改、抄袭实验记录。

实验操作记录完成后,须将实验数据录入到实验数据考评系统进行数据考核,数据考核合格,再经教师检查并签名后,方可认为实验操作过程完成。

需要强调的是,完成实验后,必须整理实验仪器、清扫实验桌面和地面,方可离开实验室。

### (三) 实验报告

实验完成后,按照数据处理要求,对实验数据进行处理,计算误差或不确定度,撰写实验报告。实验报告是对实验工作的全面总结,反映了实验的整个过程以及最终的实验结果与结论。实验报告按照要求完成在实验报告册中。报告书写要语句精练、字体整洁、阐述明晰、图表规范、结果正确、分析客观。

实验报告内容应包括以下几个方面:

- (1) 实验名称:明确实验名称。
- (2) 实验目的:说明实验项目的目标,明确实验最终待测的物理量。
- (3) 实验理论基础:简单说明本实验的理论原理,并推导相关的数学表达式。内容要尽量用自己的语言书写,不要从教材、书本或其他地方抄。

(4) 实验仪器：列出实验将使用的仪器，并做简单的说明。

(5) 实验方案及实施步骤：依据理论基础，设计合理的实验方案，并论述方案设计的理由；简单描述实验方案实施步骤。

(6) 实验数据及数据处理：用表格清晰列出实验数据；按照实验数据处理要求，处理数据，得到测量结果；除此之外，还需要对数据结果进行不确定度评定，或计算百分偏差。注意实验结果一定要科学表示。

(7) 分析讨论：对于数据结果的评估，要科学分析误差的主要产生原因和来源，并给出一定的改进方法；对实验现象的分析与解释，以及对实验中有关问题的思考、实验体会等也要在分析讨论中进行阐述。

(8) 参考文献：列出实验所参阅的参考资料和文献，包括教材。

### 三、物理实验的测量方法

基本物理量的测量是物理学中的重要问题，将待测物理量直接或间接地与作为基准的相关物理量进行比较的过程，称为测量。本节将对物理实验中几种最基本的测量方法做概括性的介绍。

#### (一) 比较法

##### 1. 直接比较法

直接比较测量法是把待测物理量  $x$  与已知的标准量或同类物理量  $s$  直接比较。这种测量方法通常要借助仪器或标准具。

##### 2. 间接比较测量法

当一些物理量无法直接测量时，需设法将被测量转变为另一种能与已知标准量直接比较的物理量。例如，用弹簧的形变测力，用水银测温度等。

在实验操作中，比较常采用以下方法：

(1) 直读法：通过标度尺示值或显示窗示值直接读出被测量。一般直读法操作简单，但精度较低。例如，用米尺测长度，用秒表测时间等。

(2) 均衡法（补偿法或示零法）：其特点是测量系统中包含有标准量具或平衡器。在测量过程中，将待测量  $x$  和标准量  $s$  直接比较，调节标准量  $s$ ，使  $s$  和  $x$  之差为零。它的优点是可以避免一些附加的系统误差，当系统具有较高精度的标准量具或平衡指示器时，能获得较高的分辨率、灵敏度及测量精确度。例如，用平衡电桥测电阻，用天平测质量等。

(3) 交换法和替代法：为消除系统误差，提高测量精度，常采用这两种方法。交换法是通过标准具测量一次待测量后，将待测量和标准具的位置交换，然后重新测量。如天平测量质量时，对待测物和砝码进行位置交换。替代法的特点是：在测量过程中交替使用标准具和待测物，使整个测量装置在两测量系统中处于相同的状态。如平衡电桥测电阻，用标准电阻箱替代待测电阻，从而直接读出电阻值。

#### (二) 放大法

放大包括两种涵义：一类是将被测信号放大，从而提高测量精度；另一类是将读数机构细

分, 达到提高测量精度的目的。

### 1. 机械放大

机械放大是一种直观的放大方法。通过丝杠齿轮、蜗轮杠杆、游标等将一些物理量进行放大。螺旋测微原理也是一种放大。

### 2. 视角放大

由于人眼分辨率的限制, 当物对人眼张角小于  $0.00157$  度时, 人眼将不能分辨细节, 而将其视为一点。利用显微镜、放大镜或望远镜对视角进行放大, 再配合读数细分机构, 提高测量精度。例如, 测微目镜、读数显微镜等。

### 3. 角放大

由光的反射定律, 入射到平面反射镜的光线, 当平面镜转过  $\theta$  角时, 反射光线相对原入射光线会转过  $2\theta$ , 每反射一次即可将变化角度放大一倍。利用此原理构成的镜尺结构, 可精确测量微小转角。如光杠杆、冲击电流计等。

## (三) 转换测量法

利用物理量间的相互关系, 将不易测量的量转换为可以 (或易于) 测量的物理量进行测量。

转换测量的方式之一是: 通过各物理量间的相互关系, 将一些测不准的量或不易测量的量转换成易于测量的量; 或是把测量物理量转换为测量物理量的改变, 也是一种行之有效的测量方法。例如, 非平衡电桥测电阻, 拉伸法测杨氏模量, 测量不规则物体体积, 均用到了这种方法。

转换测量的方式之二是: 通过各种新型材料, 如热敏、光敏、磁敏、压敏、气敏、湿敏材料制作的敏感元件和传感器, 将一些不易测量的物理量转换成易于测量的物理量。如光敏二极管、光电倍增管、霍尔元件、热敏电阻、热电偶、压电陶瓷、石英晶体等都是物理实验中常用的转换器件。

## (四) 模拟法

对于难以直接观测的测量对象, 可以从相似性原理出发, 制作相关模型, 通过对模型进行测试代替对原型的测试, 这种实验方法称模拟法。根据性质和特点的不同, 其可划分为以下几种。

### 1. 几何模拟

当原型和模型在几何形状上完全相似时, 通过对缩放后模型的物理性能及其功能进行实验, 从而研究其原型的一种方法。

### 2. 动力相似模拟

几何上的相似并不同于物理上的相似, 因此使建造的模型与原型遵从相同的物理规律或性质, 叫动力相似模拟。此时几何外形上并不完全一致。

### 3. 类比模拟

利用物质材料的类比性或相似性进行实验模拟, 用其他物质、材料或物理过程, 来模拟所研究的材料或物理过程。例如, 用非线性电路来模拟混沌现象, 用电流场模拟静电场。



#### 4. 计算机模拟

随着计算机技术的突飞猛进,虚拟现实技术在物理实验中获得广泛应用。通过计算机的模拟,对一些复杂、精密实验仪器的结构、设计思想、使用方法进行仔细的剖析,并使学生能够自行设计实验参数、反复调节和观察实验现象,分析实验结果。计算机的引入或利用,使实验教学与电脑、通信、传感器技术密切地结合到一起,为近现代物理实验提供了又一有力工具。

### 四、实验数据的处理方法

物理实验绝大多数为定量实验,数据处理则是物理实验中的关键环节,其贯穿于物理实验的整个流程,包括记录、整理、计算和分析等。下面列举一部分常用的数据处理方法。

#### (一) 列表法

在记录、处理实验数据时,常将数据列成表格,这样可简单明确表示出各物理量间的关系,也容易出现发现问题。列表法应注意以下几点:

- (1) 简单明确,便于观察各物理量之间的关系。
- (2) 表格中应标明物理量及其单位。
- (3) 记录数据应忠实原始数据,正确反映有效数字。
- (4) 若有多个表应给每个表标上名称并加以说明。

#### (二) 作图法

作图法将一系列数据间的关系或其变化情况用图线直观地表示出来。其是研究物理量间变化规律、找出对应函数关系、求出经验公式的最常用方法。作图法可以实现对多组数据取平均值的效果,易于发现问题,还可把复杂的问题简单化。其应遵循以下规则:

(1) 作图要根据需要选用坐标纸,如直角坐标纸、半对数坐标纸、对数坐标纸或极坐标纸等。用横轴代表自变量,纵轴代表因变量,并在轴末端标明物理量及单位。在纵轴上标示时,应将坐标纸旋转 $90^\circ$ ,沿轴方向书写。

(2) 横轴或纵轴的标度可以不同。原点可以不取零而取略小于数据最小值的整数定标,同时适当选取单位长度,使实验曲线均匀地铺满整张图纸。

(3) 描点和连线:应用铅笔在坐标图上描点。使用“+”、“\*”、“ $\odot$ ”等符号标明数据点。如果图上有两条以上曲线,应使用不同的符号加以区别。连线一定要用直尺或曲线板等作图工具,视情况把数据点连成直线或光滑曲线。连线时不一定要通过所有点,而要求线两边点的偏差有较均匀地分布。

#### (三) 逐差法

逐差法是处理数据的一种常用方法。当自变量等间隔变化,且两物理量间又呈线性变化时,可以采用逐差法来处理数据。

对于测量结果 $x_1, x_2, \dots, x_{2n}$ ,如果逐项求差再求平均值,其结果为

$$\bar{x} = \frac{1}{2n} \sum_{i=1}^{2n-1} (x_{i+1} - x_i) = \frac{1}{2n} (x_{2n} - x_1)$$

此时所得结果只与始末数据有关，与中间测量数据无关，没有达到多次测量减小误差的目的。

而采用逐差法处理数据可以避免中间测量数据被抵消的情况。它的一般方法是：将测量结果的偶数个测量数据，平均分成两组，将两组数据中的对应项求差，然后取其平均值，表示为

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \bar{b}_i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_{i+n} - x_i)$$

例：在质量为  $m$  的外加砝码的作用下，焦利氏秤弹簧的伸长量为  $x$  cm，其数据如表 1 所示。试用逐差法求弹簧的劲度系数  $k$ 。

表 1 外加砝码的质量  $m$  和弹簧的伸长量  $x$  之间的关系

序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$m/g$	1.00	2.00	3.00	4.00	5.00	6.00	7.00	8.00	9.00	10.00
$x/cm$	2.00	4.01	6.05	7.85	9.70	11.85	13.75	16.05	17.86	19.94

解：已知弹簧的伸长量与所受外力成正比，实验用每次增加 1.00 g 的砝码来改变弹簧的受力状态，保证了等间距变化，可以用一次逐差法处理数据。

根据逐差法的要求，先将数据对分成前后两组序号：1—5 为前组，6—10 为后组。将两组数据中的  $x$  按对应顺序逐项相减，则每隔 5 项差值的平均值为

$$\begin{aligned} \Delta \bar{x} = \overline{x_{i+5} - x_i} &= \frac{1}{5} \times [(x_6 - x_1) + (x_7 - x_2) + (x_8 - x_3) + (x_9 - x_4) + (x_{10} - x_5)] \\ &= 9.962 \text{ cm} \end{aligned}$$

所以

$$k = \frac{\Delta \bar{x}}{5m} = \frac{9.962}{5 \times 1} \text{ cm} \cdot \text{g}^{-1} = 1.99 \text{ cm} \cdot \text{g}^{-1}$$

#### (四) 最小二乘法

如实验测量量  $x$ 、 $y$  满足线性关系，且误差主要来源于其中某一变量，则可利用最小二乘法给出  $x$ 、 $y$  之间最佳的线性函数关系。

实验测得一组数据  $(x_i, y_i)$ ，如误差主要来自  $y$ ， $x$  误差较小可略去不计。最小二乘法的方法是：对这组数据进行线性拟合，找出一条最佳直线，使线上对应点的坐标  $\hat{y}_i = kx_i + b$  与实验值  $y_i$  偏差的平均平方和最小。通过微分求极值的方法将最佳参量  $k$  和  $b$  求出来。

$$\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2 = \sum_{i=1}^n (kx_i + b - y_i)^2$$

分别对  $k$  和  $b$  求导，并令其为 0，即

$$\frac{\partial}{\partial k} \sum_{i=1}^n (kx_i + b - y_i)^2 = 2 \sum_{i=1}^n (kx_i + b - y_i)x_i = 0$$

$$\frac{\partial}{\partial b} \sum_{i=1}^n (kx_i + b - y_i)^2 = 2 \sum_{i=1}^n (kx_i + b - y_i) = 0$$

令  $\bar{x} = \sum_{i=1}^n x_i/n$ ， $\bar{y} = \sum_{i=1}^n y_i/n$ ，则上式可化为

$$k \sum_{i=1}^N x_i^2 + nb\bar{x} - \sum_{i=1}^N x_i y_i = 0$$

$$k\bar{x} + b - \bar{y} = 0$$

解得

$$k = \frac{n \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2}$$

$$b = \sum y_i / n - k \sum x_i / n = \bar{y} - k \bar{x}$$

从而确定了  $x$ 、 $y$  之间的线性函数关系。

### (五) 内插法和外推法

内插和外推是常用的近似算法，内插法有线性内插和非线性内插。各种数学用表或物理学量表的尾数值一般都是用线性内插得到的，仪器的校准曲线也常常在两个校准点之间用线性内插作近似。外推法在实验中也用得很多，如用作图法从截距求某些物理量的值就是外推法。外推法常用的也是线性外推，也有按一定函数关系的其他外推。

#### 1. 线性内插

如果所求函数值与自变量的关系是单调的，我们可以假定在小范围内的变化呈线性关系，则利用内插法得到的结果与实际是相符的。

例 1：用线性内插求 14.3 °C 时水的密度  $\rho$ 。

$$\rho(14.0 \text{ } ^\circ\text{C}) = 0.999\ 27 \text{ g/cm}^3, \quad \rho(15.0 \text{ } ^\circ\text{C}) = 0.999\ 13 \text{ g/cm}^3$$

$$\begin{aligned} \text{解：已知 } \rho(14.3 \text{ } ^\circ\text{C}) &= [0.999\ 27 + (0.999\ 13 - 0.999\ 27) \times 0.3] \text{ g/cm}^3 \\ &= (0.999\ 27 - 0.000\ 04) \text{ g/cm}^3 = 0.999\ 23 \text{ g/cm}^3 \end{aligned}$$

用线性内插的方法还可以求数值的方根，它可以达到相当程度上的精确度。

例 2：求  $\sqrt{1\ 593} = ?$

解：已知  $40^2 = 1\ 600$ ， $39^2 = 1\ 521$ ， $40^2$  与  $39^2$  之间差为 79。

$$\sqrt{1\ 593} = 40 - \frac{1}{79} \times (1\ 600 - 1\ 593)$$

$$\approx 40 - 0.088\ 6 = 39.911\ 4$$

用计算器算得  $\sqrt{1\ 593} = 39.912\ 4$ 。

#### 2. 非线性内插、非线性外推

利用非线性函数进行内插或外推常常可以取得比线性内插更加符合实际的结果。进行非线性内插或外推首先必须知道或假设函数的形式，然后用作图法或逐差法，更常用的是回归法来进行。用回归法进行非线性内插或外推就是由测量数据得出回归方程，然后定出在特定的点（内插点或外推点）的数值。

对于自变量  $x$  和因变量  $Y$ ，测得的两组数据为

$$Y_1 = f(x_1), \quad Y_2 = f(x_2), \quad \dots, \quad Y_n = f(x_n)$$

利用线性内插求  $f(x_i)$ ，则

$$f(x_i) = f(x_1) + \frac{Y_n - Y_1}{n - 1} (i - 1)$$



若  $Y$  和  $x$  之间不满足线性关系, 这样推导的误差将会是很大的。

设实际上  $Y$  和  $x$  之间满足

$$Y = a + bx + c(x)$$

可利用作图法作出  $Y=f(x)$  进行非线性拟合, 然后通过图示得出自变量  $x_i$  对应的函数值  $Y=f(x_i)$ 。

总之, 用内插法或外推法处理数据是先假定函数在内插区间内或外推区间内的函数形式。如果假设与实际相符, 则能得出正确的结果; 如果假定与实际背离, 则将得出不正确的结果。

## 五、实验结果的科学表示

测量是物理实验的基本操作, 其实质是将待测物理量与相应的标准作定量比较。测量结果应包括数值、单位以及结果可信赖程度的评估 (不确定度)。

测量分为直接测量和间接测量。利用测量工具 (测量仪器) 并按一定操作程序, 将被测对象与测量工具所提供的标准量进行比较并直接读出测量结果的测量方法称为直接测量。将一个被测量转换为若干可直接测量的量加以测量, 而后再依据由定义或规律导出的关系式 (即测量式) 进行计算或作图, 从而间接获得测量结果的测量方法称为间接测量。

实验结果应按以下科学格式书写:

$$N(\text{测量量}) = \bar{N}(\text{测量结果}) \pm U(\text{不确定度})$$

$$U_r(\text{相对不确定度}) = \frac{U}{\bar{N}} \times 100\%$$

### (一) 测量误差

由于测定仪器、实验条件的局限, 测量不可能无限精确。测量结果与客观存在的真值之间总存在一定偏差, 这种偏差叫测量值的误差, 即

$$\text{测量误差} = \text{测量值} - \text{真值}$$

误差的大小反映了人们的认识接近于客观真实的程度。引起误差的原因是多种多样的, 根据误差产生的原因和性质, 可将其分为系统误差和偶然 (随机) 误差两大类。

#### 1. 系统误差

系统误差来源于某些确定的因素, 其特点是在确定条件下多次测量同一物理量时, 误差的符号保持恒定, 或者在条件改变时误差按一定规律变化。仪器固有缺陷 (刻度不准、零点未校正、元件老化等)、外界环境的影响或干扰 (如温度、气压、湿度的规则变化)、测量原理的近似性或者测量方法不周全、观察者个人生理因素或不良测量习惯的限制 (如用停表计时, 总比别人按得快一点) 等都属于系统误差。

系统误差的出现一般都有较明确的原因, 针对产生原因采取适当的方法, 可以消除其影响或者对测量结果进行修正。

#### 2. 偶然误差

偶然误差来源于一些随时随地都会发生的微小的不可控制的因素, 其找不到因果关系, 因此也叫随机误差。在完全确定的条件下所做的多次测量中, 这种误差的数值时大时小, 符号时正时负, 不可预知, 但服从一定的统计规律。无规则的温度变化, 电压、电流的波动等属于偶