



普通高等教育农业农村部“十三五”规划教材



全国高等农林院校“十三五”规划教材

大学物理 实验

DAXUE WULI
SHIYAN

李 辉 李 聪◎主编

 中国农业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

大学物理实验 / 李辉, 李聪主编. —北京: 中国农业出版社, 2019. 8 (2020. 8 重印)
普通高等教育农业农村部“十三五”规划教材 全国
高等农林院校“十三五”规划教材
ISBN 978-7-109-25638-5

I. ①大… II. ①李… ②李… 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 (2019) 第 124610 号

中国农业出版社出版

地址: 北京市朝阳区麦子店街 18 号楼

邮编: 100125

责任编辑: 马颢晨 薛波 文字编辑: 马颢晨

版式设计: 韩小丽 责任校对: 周丽芳

印刷: 北京印刷一厂

版次: 2019 年 8 月第 1 版

印次: 2020 年 8 月北京第 2 次印刷

发行: 新华书店北京发行所

开本: 787mm×1092mm 1/16

印张: 12

字数: 312 千字

定价: 28.50 元

版权所有·侵权必究

凡购买本社图书, 如有印装质量问题, 我社负责调换。

服务电话: 010-59195115 010-59194918

本书是普通高等教育农业农村部“十三五”规划教材、全国高等农林院校“十三五”规划教材。

本书介绍了误差与数据处理的基本知识和电学实验器件，精选了力学、热学、电学、光学及近代物理等 25 个实验，其中基础实验 12 个，综合性实验 7 个，设计性实验 6 个。大部分实验后附有扩展阅读，涉及物理学的发展历史及实际应用等内容。每章后附有实验报告模板，每个实验报告配有思考题，供学生预习和总结。通过实验报告模板，学生可以更好地明确实验原理，掌握实验方法，完成实验内容，养成撰写规范实验报告的习惯。

本书可作为普通高等院校非物理专业的理、工、农、医类各专业的大学物理实验课的实验教材，也可作为实验技术人员和工程技术人员的参考书。

编写人员

主 编 李 辉 李 聪

副 主 编 马斌强 冯朝岭 李 霞

编 者 (按姓氏笔画排序)

马斌强 冯朝岭 刘小标

祁诗阳 李 辉 李 聪

李 霞 张益维 张梦娇

郑 丹 郑宝周 贾 芳

贾树恒 高海燕 滕红丽

大学物理实验是高等院校理、工、农、医类各专业必修的基础课程，是大学生进入大学后接受系统科学实验方法和实验技能训练的开端，它是培养学生严谨的科学思维方式、创新意识、创新能力和实践能力的极其重要的教学环节。大学物理实验覆盖了广泛的学科领域，有丰富的实验思想、方法、手段，具有综合性强的特点。该课程可培养学生的实验能力，提高其科学素质，同时在培养学生严谨的治学态度、活跃的创新意识、适应科技发展的综合应用能力等方面，具有其他实践类课程不可替代的作用。

为适应基础教育和素质教育的需要，根据教育部颁布的《理工科类大学物理实验课程教学基本要求》，编者结合多年的实验教学经验和体会，汲取众多国内外优秀教材的优点，再次整理编写了本实验教材。

本书介绍了误差与数据处理的基本知识和电学实验器件，精选了力学、热学、电学、光学及近代物理等 25 个实验，其中基础实验 12 个，综合性实验 7 个，设计性实验 6 个。编者根据多年教学实践，在每个实验后尽量增加了扩展阅读，涉及物理学的发展历史及实际应用等内容，提升学生的阅读兴趣，扩展知识面，以期达到有效提升其综合素质的目的。每章后附有实验报告模板，每个实验报告配有思考题，供学生预习和总结。通过实验报告模板，学生可以更好地明确实验原理，掌握实验方法，完成实验内容，养成撰写规范实验报告的习惯。本书编写过程中，在保证学生掌握基本实验技能的基础上增加了设计性实验的内容。设计性实验是一种较高层次的实验训练，要求学生根据实验内容和要求查阅有关参考资料，设计实验原理和实验步骤，独立完成实验，从而拓展学生思维，提高学生理论联系实际的能力，进而发挥学生的创造性，培养学生的创新能力。本书给出的实验设计题目均和所学内容相关，以起到启发思路、抛砖引玉的作用。

参加本书编写的有河南农业大学的马斌强、冯朝岭、刘小标、祁诗阳、李辉、李聪、张益维、张梦娇、郑丹、郑宝周、贾芳、贾树恒和滕红丽，西北农林科技大学的李霞，华北水利水电大学的高海燕，其中李辉和李聪任主编，马斌强、冯朝岭和李霞任副主编，具体编写分工如下：李聪和李辉编写第一章，马斌强编写第二章和第五章，贾树恒、张益维、滕红丽和张梦娇编写第三章和第四章，其他老师参与了收集材料、核对和审阅工作，全书由李辉和李聪统一审稿。本书编者均为多年来一直从事大学物理教学工作的教师，对物理实验教学积累了丰富的经验并有许多独到的见解，这些经验和体会已被融入教材。

河南农业大学电子信息科学与技术系的全体老师对本书的编写给予了大力的支持并提出了宝贵的意见，在此一并致谢。

由于编者水平有限，难免有疏漏和不妥之处，恳请广大读者批评指正。

编 者

2019年4月

前言

第一章 绪论	1
--------------	---

第二章 基础知识	3
----------------	---

第一节 测量误差与数据处理	3
---------------------	---

第二节 电学实验器件	13
------------------	----

[附] 基础知识作业	18
------------------	----

第三章 基础实验	23
----------------	----

实验 1 长度测量	23
-----------------	----

实验 2 谐振动的研究	28
-------------------	----

实验 3 用拉伸法测金属丝的杨氏模量	32
--------------------------	----

实验 4 液体黏滞系数的测定	37
----------------------	----

实验 5 用拉脱法测液体的表面张力系数	40
---------------------------	----

实验 6 固体线膨胀系数的测定	44
-----------------------	----

实验 7 直流电阻电桥测电阻	48
----------------------	----

实验 8 电位差计的应用	52
--------------------	----

实验 9 示波器的使用	55
-------------------	----

实验 10 利用霍尔效应测量通电螺线管的磁场	61
------------------------------	----

实验 11 用牛顿环测量平凸透镜的曲率半径	65
-----------------------------	----

实验 12 用旋光仪测有机溶液的浓度	69
--------------------------	----

[附] 实验报告模板	74
------------------	----

第四章 综合性实验	105
-----------------	-----

实验 13 空气比热容比的测定	105
-----------------------	-----

实验 14 刚体转动惯量的测定	108
-----------------------	-----

实验 15 电表的改装与校准	112
----------------------	-----

实验 16 用模拟法测绘静电场分布	115
-------------------------	-----

实验 17 电子束实验	119
-------------------	-----

实验 18 偏振光的实验研究	123
----------------------	-----

实验 19 光电效应	129
------------------	-----

[附] 实验报告模板	132
------------------	-----

第五章 设计性实验	155
实验 20 用振动法测弹簧的劲度系数	155
实验 21 物体密度的测定	156
实验 22 用箱式电桥测定电流计内阻	157
实验 23 电流表的扩程	158
实验 24 测绘伏安特性曲线	159
实验 25 用牛顿环测液体折射率	160
[附] 实验报告模板	160
附录 常用物理量表	173
主要参考文献	182

1 第一章

绪 论

物理学是一门理论与实验紧密结合的学科。它是研究自然规律、认识客观世界、改造客观世界的基本手段。回顾物理学发展史，任何物理新概念的确立、新规律的发现，都须以严密的物理实验为依据，许多重要的规律都是在总结大量实验事实的基础上得到的。即使在今天，虽说理论物理对实验物理的预见和指导起着重要作用，但理论规律和结论仍须受到实践的检验。所以要学好物理学，就应当学习物理实验的理论和方法，并在一定程度上掌握物理实验的基本技能。

一、物理实验课的地位和基本任务

物理实验是对理科、工科、农科学生进行科学实验基本训练的一门独立的必修课，是学生进入大学后接受系统实验方法和实验技能训练的开端，也是培养学生实验技能和科学素质的基础。

在高等农林院校开设物理实验课，力求达到以下目的：

(1) 通过对物理现象的观察、分析和对物理量的测量，学习物理实验的相关知识，加深对物理概念和原理的理解，培养实事求是的工作态度和作风。

(2) 培养和提高学生的实验技能，主要包括以下几方面的任务：

① 通过预习实验内容及阅读相关资料、组织实验，提高查阅和运用资料的能力，并能概括出实验原理和方法的要点。

② 通过正确地使用仪器，了解它的原理、结构和使用方法，掌握基本物理量的测量方法和实验操作技能。

③ 培养和提高学生从事科学实验的初步能力，包括实验数据处理及误差分析的能力、获得准确实验结果的能力。

④ 通过正确地记录及科学地处理实验数据，撰写合格的实验报告，提高科学论述能力、表达能力以及自行设计和完成某些不太复杂实验的能力。

二、物理实验课的基本程序与要求

物理实验课的基本程序一般分为三个阶段：课前预习、实验操作和撰写实验报告。

(1) 课前预习。预习的目的在于实验之前对实验内容有一个总体上的了解。通过预习应当弄清以下问题：

① 实验的理论依据和条件。

② 实验仪器的选取。

③ 所用仪器的工作原理及操作方法。

④ 实验过程的注意事项。

⑤ 记录与处理实验数据的方法。

⑥ 对实验结果的预测。

在此基础上，写出预习报告，其主要内容包括：

① 实验名称及要求。

② 实验原理、计算公式及其使用条件、电路图、光路图和装置简图等。

③ 实验所需仪器的名称、数量及使用时的注意事项。

④ 实验步骤。

⑤ 合理的实验数据记录表格。

(2) 实验操作。实验操作是实验程序中的关键环节。学生须遵守实验室规则，听从教师指导，熟悉各个仪器的使用方法及操作规范，认真完成实验。

实验操作应注意以下几点：

① 按教材中规定的实验程序和步骤进行操作。这是因为，教材中的实验步骤是根据实验原理和具体仪器设计得出的，它是获得正确数据和结果的最佳实验方案之一。

② 根据实验的具体要求，依据有效数字法则，认真记录实验数据，绝不允许伪造或抄袭他人数据。

③ 为养成良好的工作作风，在做完实验后，务必将所用仪器设备恢复原位，关闭电源和水源，做好实验室清洁工作，并将原始数据单交教师审阅签字后再离开实验室。

(3) 撰写实验报告。撰写实验报告是对实验的一次全面总结，也可作为科学报告或论文写作的基本训练。所以在做完实验后，应对实验数据进行认真的处理和分析，得出合理结论，最后写出完整的实验报告。具体要求如下：

① 数据处理。实验结果是对大量数据的总结和升华，只有科学地处理实验数据，才能实现从感性认识到理性认识的飞跃。所以，在数据处理过程中，首先，按照误差理论和有效数字运算规则整理数据、列表或绘出曲线；然后，计算、分析实验数据的特点和规律以及由此而得出的结论；最后，分析误差的来源，并讨论存在的问题和改进方法。

② 撰写实验报告。完整的实验报告应包括实验目的、实验仪器（仪器的名称、性能及精度）、实验原理和方法、实验数据记录及处理（包括图表）、误差分析及问题讨论。

在撰写实验报告时，应力求报告内容简单明了，用语确切，文字通顺，字迹工整。还应在报告的开头注明实验时间、实验者姓名。经教师签名的原始数据记录单也应作为实验报告的附件一起上交。

2 第二章

基础知识

第一节 测量误差与数据处理

本节是自学材料，介绍测量误差、实验数据处理和实验结果的表示等方面的内容。这些内容不仅要在每个实验中用到，而且是今后从事科学研究必须掌握的基础知识和基本技能。这部分内容牵涉面广，不可能在一两次学习中掌握，应结合自己已经掌握的知识，对提到的问题先有一个初步的了解，然后针对每个具体实验再详细阅读有关内容，并通过运用加以掌握。本节附有练习题，可以加深对这些内容的理解。

一、测量误差

测量是物理实验的基础。对每个物理现象的研究、物质特性的认识、物理原理的验证都要通过测量来实现。一般说来，测量必须借助于一定的仪器，采用一定的方法，在人为控制的环境下由实验者来完成。但是在实际测量中，往往由于测量仪器的限制，测量依据的理论公式应满足的条件不可能绝对保证，加之实验技术、环境条件等因素的影响，测量不可能无限制地精确。测量值与被测量的真实值（简称真值）之间总是存在着差异，即测量不可避免地会产生误差。因此，分析测量中可能产生的各种误差，尽可能地消除其影响，并对测量结果中未能消除的误差做出准确估计，是所有科学实验必不可少的任务。本节主要介绍误差的概念、特点、产生的原因和估算方法等有关知识。

（一）误差的概念

测量误差就是测量结果与被测量的真值（或约定真值）间的差值。测量误差的大小反映了测量结果的准确程度。测量误差可以用绝对误差表示，也可以用相对误差来表示：

$$\text{绝对误差} = \text{测量结果} - \text{被测量的真值}$$

$$\text{相对误差 } E = \frac{\text{测量值的绝对误差}}{\text{被测量的真值}} \times 100\%$$

事实上，被测量的真值是未知的。人们对客观物质世界建立的“量”的概念，也是通过各种测量手段和方法了解到其测量值的，因而以上关于误差的定义还不能直接用于实际中。于是，人们便依据测量学原理和数理统计学的理论建立了各种误差理论，用来科学地估算测量误差。

（二）误差的分类

从研究误差的需要出发，根据误差产生的原因和性质的差异，可将测量中的误差分为系统误差和随机误差。

1. 系统误差 在相同的实验条件下，对同一物理量进行多次测量中，如果出现的误差

大小与正负保持不变,或按确定的规律变化(递增、递减、周期性等),这种测量误差称为系统误差。系统误差的种类很多,按其来源可分为以下几种:

(1) 方法误差。方法误差是由于测量所用理论公式的近似性及公式中的各参数确定的近似性而引起的误差。产生这一误差的原因在于测量过程中存在着实际上起作用且不能忽略的因素,如空气的阻力和浮力、电表的内阻、连线电阻的压降等,这些因素在推导测量结果的表达式中没有得到反映或被忽略,从而引起了实验误差。

(2) 条件误差。条件误差是由于外界环境因素(如温度、湿度、压力、振动、电磁场等)与要求的标准状态不一致,使测量装置的指示量值发生变化,以及观察者在生理上的视觉分辨能力、感觉器官的生理变化、反应速度和固有习惯引起的误差。

(3) 仪器误差。仪器误差是由于测量设备(包括测量工具、仪器、量具等)本身不完善,或由于测量设备的安装、布置、调整不得当(例如,米尺刻度不准确、螺旋测微器有空行程、仪表调零不准等)而产生的误差。

由此可见,系统误差的出现都具有某种确定的规律性。但是,这种规律对不同的实验测量是不同的,只能针对每一具体情况采用不同的处理方法。这就要求实验者对研究对象的特殊规律要有充分的掌握,同时实验者在实验经验、实验技巧和理论水平等方面应有相当的水平,并且要使所用仪器设备的性能处于良好的状态。一般地说,处理系统误差是比较困难的,甚至会在自觉或不自觉中被遗漏。

2. 随机误差 随机误差是由于不确定因素引起的误差。它的特征表现为,就某一次测量来讲,其误差值的大小和正负都带有随机性,难以事先确定。但对大量次数的重复测量来说,测量的结果却遵从一定的统计规律。这种误差产生的原因是多方面的,例如,实验条件 and 环境因素的微小的、无规则的起伏及其实验者生理分辨本领、实验技能的熟练程度等因素。

随机误差可以根据统计理论进行处理。大量的实验事实及统计理论都证明,当随机误差由许多微小的、彼此独立的随机因素决定时,其误差分布服从正态分布规律(图2-1-1)。主要特征表现在以下四个方面:

(1) 有界性。绝对值很大的误差出现的概率为零,即误差的绝对值不会超过一定的界限。

(2) 单峰性。绝对值小的误差出现的概率比绝对值大的误差出现的概率大。

(3) 对称性。绝对值相等的正误差和负误差出现的概率接近相等。

(4) 抵偿性。由于绝对值相等的正、负误差出现的概率接近相等,因而随着测量次数的增加,随机误差的算术平均值将趋于零。

抵偿性是随机误差最本质的统计特征。一般地讲,凡是具有抵偿性的误差,原则上可以按随机误差处理。

根据随机误差的分布特征,我们知道:①在多次测量中,正、负随机误差大致上可以相互抵消,因而用多次测量的算术平均值表示测量结果可以减小随机误差的影响;②测量值的分散程度直接体现随机误差的大小,测量值越分散,测量的随机误差就越大。因此,只有对随机误差做出估算才能表示测量的精密度。

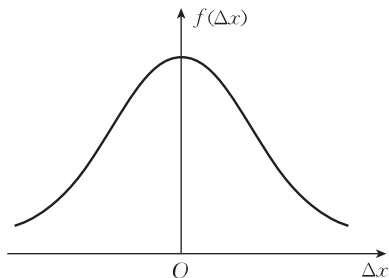


图 2-1-1 随机误差的正态分布

二、测量的不确定度

(一) 测量的不确定度

由于测量时被测量的真值是未知的，因此，测量的绝对误差或相对误差也无法算出。引入不确定度这一概念可以在真值未知的情况下，给出被测量值所处的量值范围，对测量误差有一个定量的估计，以衡量测量结果的可靠性。在给出测量结果时，同时要给出相应测量的不确定度，以表明该测量结果的可信赖程度。这样，一个完整的测量结果由三个要素组成，即真值的最佳估计值、不确定度和单位，通常的表示形式为

被测量 = 真值的最佳估计值 ± 不确定度 (单位)

目前世界上已普遍采用不确定度来表示测量结果的误差。1992年1月，国家计量技术规范《测量误差及数据处理》正式颁布实行，其中明确规定：测量结果的评价采用不确定度而不用误差。

1. 不确定度的定义 由于测量误差的存在，对被测量值不能确定的程度称为不确定度。它是表征被测量值所处的量值范围的评定，即被测量值用一个量值范围而不是一个单一的数值表示，并且被测量物理量的真值也不是必定在这个量值范围内，而是以一定的概率（称为“置信水平”）处于其中。不确定度越小，测量结果与被测量的真值越接近，质量越高，水平越高，其使用价值越高；不确定度越大，测量结果的质量越低，水平越低，其使用价值也越低。在报告物理量测量的结果时，必须给出相应的不确定度，一方面便于使用它的人评定其可靠性，另一方面也增强了测量结果之间的可比性。

2. 不确定度的分类 产生测量不确定度的因素很多，测量结果的不确定度包含多个分量，总的确定度是各分量合成的结果。按获得方法的不同，这些分量可以分为 A 类不确定度和 B 类不确定度。

(1) A 类不确定度。可以通过统计方法来计算的不确定度称为 A 类不确定度，也称为统计不确定度，用字母 S 表示。

由于误差来源不同，被测量物理量的 A 类不确定度可以有多个分量，设各分量分别为 $S_1, S_2, \dots, S_n$ ，并且各分量彼此独立，则总的 A 类不确定度可由“方和根”计算，即

$$S = \sqrt{S_1^2 + S_2^2 + \dots + S_n^2} \quad (2-1-1)$$

直接测量量的 A 类不确定度只有一个分量 S_1 ，即 $S = S_1$ 。

(2) B 类不确定度。用非统计方法计算得到的不确定度为 B 类不确定度，用字母 u 表示。由于误差来源不同，包含多个分量的 B 类不确定度也可以由“方和根”计算，即

$$u = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + \dots + u_n^2} \quad (2-1-2)$$

式中， $u_1, u_2, \dots, u_n$ 为彼此独立的 B 类不确定度分量。直接测量量的 B 类不确定度只有一个分量 u_1 ，即 $u = u_1$ 。

(3) 总不确定度。引起测量误差的因素很多，每种误差来源对测量结果不确定度的贡献大小不同，测量结果的总不确定度是各种不确定度分量的合成。首先，尽可能消除系统误差；然后，剩余误差给出的不确定度分量可以分为 A 类不确定度 $S_1, S_2, \dots, S_i, \dots, S_n$ 和 B 类不确定度 $u_1, u_2, \dots, u_j, \dots, u_m$ ，它们分别由统计方法和非统计方法分析得到。如果各误差的影响是相互独立的，则对应的各不确定度分量也是相互独立的，测量结果的总

不确定度 U 可以采用“方和根”的方法计算。

$$U = \sqrt{S^2 + u^2} = \sqrt{\sum_{i=1}^n S_i^2 + \sum_{j=1}^m u_j^2} \quad (2-1-3)$$

(二) 直接测量的不确定度

1. 直接测量的 A 类不确定度 设在实验中对某一物理量 x 进行了 n 次等精度的重复测量, 获得了 n 个数据, 分别为

$$x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n$$

其算术平均值为

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (2-1-4)$$

那么, 被测量 x 的 A 类不确定度与随机误差计算标准偏差的方法相同, 即测量不确定度为

$$S_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (2-1-5)$$

平均值 $\bar{x}$ 的 A 类不确定度为

$$S_{\bar{x}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}} \quad (2-1-6)$$

一般情况下, S_x 的值愈大, $S_{\bar{x}}$ 也愈大, 但 $S_{\bar{x}}$ 随测量次数的增加而减小。

2. 直接测量的 B 类不确定度 测量结果中的 B 类不确定度主要取决于仪器误差, 经常以仪器误差限 Δ_{ins} (仪器误差的最大值) 的形式出现, 通常把仪器误差的估计值 S_{ins} (标准差) 作为 B 类不确定度。 Δ_{ins} 和 S_{ins} 的关系是

$$u = S_{\text{ins}} = \frac{\Delta_{\text{ins}}}{K} \quad (2-1-7)$$

式中, K 是一个与仪器误差分布有关的常数 (称为包含因子)。物理教学中, 为保证较高的置信概率, 同时提高数据处理的效率, 约定仪器误差按均匀分布处理, 则仪器误差贡献的 B 类不确定度为

$$u = \frac{\Delta_{\text{ins}}}{\sqrt{3}} \quad (2-1-8)$$

3. 直接测量的合成不确定度 直接测量的合成不确定度 U 由“方和根”公式算出:

$$U = \sqrt{\sum_i S_i^2 + \sum_j u_j^2} \quad (2-1-9)$$

其中, S_i 是 A 类不确定度的各分量, u_j 是 B 类不确定度的各分量。

4. 直接测量结果的表示 测量结果的算术平均值 $\bar{x}$ 是真值的最佳估计值, 不确定度 U 是误差的最佳估计值, 实际的测量结果就可以表示为

$$x = \bar{x} \pm U \text{ (单位)} \quad (2-1-10)$$

需要特别注意的是, 式 (2-1-10) 在本教材中表示真值位于置信区间 $[\bar{x}-U, \bar{x}+U]$ 内的概率为 68.3%, 即误差在 $\pm U$ 之间的概率为 68.3%。

定义相对不确定度为

$$U_r = \frac{U}{\bar{x}} \times 100\% \quad (2-1-11)$$

它是相对误差的估计值。

这里需要说明：

(1) 由于不确定度本身只是一个估计值，因此，在一般情况下，表示最后结果的不确定度只取一位有效数字，最多不超过两位。而且，测量平均值的最后一位要与不确定度的最后一位对齐。

(2) 在科学实验或工程技术中，有时不要求或不可能明确表明测量结果的不确定度，这时常有效数字粗略表示测量的不确定度，即测量值有效数字的最后一位表示不确定度的所在位。因此数据记录时要注意有效数字，不能随意增减。

(三) 间接测量的不确定度

当未知的物理量与几个参量之间存在一定的函数关系时，应先直接测量这些参量，然后代入函数式中进行计算，从而求得未知物理量的测量值，这种测量称为间接测量。

在很多实验中进行的测量都是间接测量。间接测量量是由直接测量量根据一定的数学表达式计算出来的。因此，直接测量量的不确定度就必然影响到间接测量量，这种影响的大小也可以由相应的数学公式计算出来。

1. 间接测量的 A 类不确定度的传递公式 直接测量的 A 类不确定度是由标准偏差来表征的，因此间接测量的 A 类不确定度实际上就是标准偏差的传递。首先讨论随机误差的标准偏差的传递，得出与随机误差对应的间接测量的 A 类不确定度 S 的传递公式，然后推广得到合成不确定度 U 的传递公式。

设间接测量量 z 与相互独立的两直接测量量 x, y 满足函数关系 $z = f(x, y)$ 。对其求全微分可得

$$dz = \frac{\partial f}{\partial x} dx + \frac{\partial f}{\partial y} dy \quad (2-1-12)$$

若直接测量量 x, y 的误差分别为 $\delta x, \delta y$ ，且

$$\delta x = x_i - \bar{x}, \quad \delta y = y_i - \bar{y}$$

它们都比对应测量结果小得多，因此可以作为微元代替全微分公式中的 dx, dy ，得到间接测量量 z 的误差 δz 为

$$\delta z = \frac{\partial z}{\partial x} \delta x + \frac{\partial z}{\partial y} \delta y \quad (2-1-13)$$

式 (2-1-12) 称为测量误差传递公式，其中 $\frac{\partial f}{\partial x}, \frac{\partial f}{\partial y}$ 称为各直接测量量的误差传递系数。

式 (2-1-13) 表明间接测量量的误差 δz 是各直接测量量的误差 $\delta x, \delta y$ 与相应误差传递系数 $\frac{\partial f}{\partial x}, \frac{\partial f}{\partial y}$ 的乘积的代数和。也就是说，间接测量结果的总误差 δz 是各误差分量的线性叠加。

根据式 (2-1-5) 可得间接测量量 z 的测量不确定度：

$$S_z = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (z_i - \bar{z})^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{\sum (\delta z)^2}{n-1}}$$

于是,

$$\begin{aligned} S_z^2 &= \frac{1}{n-1} \sum \left(\frac{\partial z}{\partial x} \delta x + \frac{\partial z}{\partial y} \delta y \right)^2 \\ &= \frac{1}{n-1} \sum \left[\left(\frac{\partial z}{\partial x} \right)^2 \cdot (\delta x)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial y} \right)^2 \cdot (\delta y)^2 + 2 \frac{\partial z}{\partial x} \frac{\partial z}{\partial y} \delta x \delta y \right] \\ &= \left(\frac{\partial z}{\partial x} \right)^2 \frac{1}{n-1} \sum (\delta x)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial y} \right)^2 \frac{1}{n-1} \sum (\delta y)^2 + \frac{2}{n-1} \frac{\partial z}{\partial x} \frac{\partial z}{\partial y} \sum \delta x \delta y \end{aligned}$$

对于相互独立的被测量量 x, y , 测量值在各自的平均值两侧等概率地取值, 因此有

$$\sum \delta x \delta y = 0$$

最后可得

$$S_z = \sqrt{\left(\frac{\partial z}{\partial x} \right)^2 S_x^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial y} \right)^2 S_y^2} \quad (2-1-14)$$

$$S_z = \sqrt{\left(\frac{\partial z}{\partial x} \right)^2 S_x^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial y} \right)^2 S_y^2} \quad (2-1-15)$$

2. 间接测量的合成不确定度的传递公式 与 A 类不确定度传递公式的推导过程类似, 可以得到合成不确定度 U 的传递公式, 即

$$U_z = \sqrt{\left(\frac{\partial z}{\partial x} \right)^2 U_x^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial y} \right)^2 U_y^2} \quad (2-1-16)$$

式中, $U_x = \sqrt{S_x^2 + u_x^2}$ 为任一直接测量量 x 的合成不确定度, U_z 为间接测量量 z 的合成不确定度。式 (2-1-16) 表明合成不确定度 U_z 也是由各不确定度分量 U_x, U_y 按“方和根”方法合成的。

若 $z=f(x, y)$ 中变量 x, y 之间是和差关系, 那么按式 (2-1-16) 计算间接测量量 z 的不确定度是方便的。但是, 若 $z=f(x, y)$ 中变量 x, y 之间是积或商关系, 则对 z 先求对数后再求全微分比较方便, 即

$$\begin{aligned} \ln z &= \ln f(x, y) \\ \frac{\delta z}{z} &= \frac{\partial \ln z}{\partial x} \delta x + \frac{\partial \ln z}{\partial y} \delta y \end{aligned}$$

利用相对不确定度的定义, 可得

$$\frac{U_z}{z} = \sqrt{\left(\frac{\partial \ln f}{\partial x} \right)^2 U_x^2 + \left(\frac{\partial \ln f}{\partial y} \right)^2 U_y^2} \quad (2-1-17)$$

一些常用函数的不确定度传递公式见表 2-1-1。

表 2-1-1 一些常用函数的不确定度传递公式

函数表达式	测量不确定度传递公式
$z = x \pm y$	$U_z = \sqrt{U_x^2 + U_y^2}$
$z = xy$ 或 $z = \frac{x}{y}$	$\frac{U_z}{z} = \sqrt{\left(\frac{U_x}{x} \right)^2 + \left(\frac{U_y}{y} \right)^2}$
$z = kx$	$U_z = k \cdot U_x$

(续)

函数表达式	测量不确定度传递公式
$z = x^{\frac{1}{k}}$	$\frac{U_z}{\bar{z}} = \frac{1}{k} \cdot \frac{U_x}{\bar{x}}$
$z = \frac{x^k y^m}{w^n}$	$\frac{U_z}{\bar{z}} = \sqrt{k^2 \left(\frac{U_x}{\bar{x}}\right)^2 + m^2 \left(\frac{U_y}{\bar{y}}\right)^2 + n^2 \left(\frac{U_w}{\bar{w}}\right)^2}$
$z = \sin x$	$U_z = \cos \bar{x} \cdot U_x$
$z = \ln x$	$U_z = \frac{U_x}{\bar{x}}$

应用不确定度传递公式估算间接测量量的不确定度时应注意：

(1) 如果函数形式是若干个直接测量量相加减，则用式 (2-1-16) 计算间接测量量的不确定度比较方便。如果函数形式是若干个直接测量量相乘除，则先用式 (2-1-17) 计算间接测量量的相对不确定度 $U_{r,z}$ 比较方便，然后再通过公式 $U_z = \left(\frac{U_z}{\bar{z}}\right) \cdot \bar{z} = U_{r,z} \cdot \bar{z}$ 求出总不确定度。

(2) 如果间接测量量中某几个直接测量量是单次测量，则直接用单次测量的结果及不确定度代入不确定度传递公式。

3. 间接测量结果的表示 间接测量结果的完整表示方法与直接测量类似，写成

$$\begin{cases} z = \bar{z} \pm U_z \text{ (单位)} \\ U_{r,z} = \frac{U_z}{\bar{z}} \times 100\% \end{cases} \quad (2-1-18)$$

式中， $\bar{z}$ 为间接测量量 z 的最佳值，由各直接测量量的平均值代入函数关系式求得； $U_{r,z}$ 为间接测量量 z 的相对不确定度，由不确定度传递公式 (2-1-17) 求得。

三、有效数字及其运算法则

如前所述，既然任何实验结果都存在着误差，那么直接测量各待测量时，应取几位有效数字？在按函数关系计算间接测量结果的数值时，应保留几位有效数字？这都是不能随意确定的，必须采用有效数字及其运算法则，这是大学物理实验课的基本要求之一，也为将来科学实验的数据处理打下必要的基础。

(一) 有效数字

在测量中，凡是用仪器和量具直接读出的数字（包括最后一位估读数字）都称为有效数字，它只允许测量值的最后一位出现误差。例如用最小分度为毫米的直尺，测得型钢的宽度是 12.35 cm，这个读数的前三位“12.3”是直接从直尺上读出的可靠数字，而末位的“5”则是估计的读数，所以读取上述数字至少有 $\pm 0.1 \text{ mm}$ 的误差。

(二) 有效数字的性质

(1) 有效数字的多少与被测对象的大小有关。

(2) 有效数字的多少与测量仪器的精密度有关。例如，测量一平板玻璃的厚度，用米尺测得为 2.34 cm，是三位有效数字（读到 0.01 cm）；用游标卡尺测得为 2.342 cm，是四位有效数字（读到 0.001 cm）；用螺旋测微器测得为 2.3425 cm，是五位有效数字

(读到 0.000 1 cm)。可见,仪器的精确度越高,测量同一被测对象,所得的有效数字也就越多。

(3) 有效数字的多少还与测量的方法有关。如用单摆周期公式 $T=2\pi\sqrt{\frac{L}{g}}$ 测量某地的重力加速度 g , 应使用米尺和秒表分别测量摆长 L 和周期 T 。用秒表测量一物体运动的时间时,测量误差主要由启动和止动秒表时手的动作与目测协调的情况而定,一般估计启动和止动时各有 0.1 s 误差,总的误差为 0.2 s,测量单摆周期时,如果每次只测量一个周期,得 T 为 1.9 s。为了减小相对误差,提高测量的相对精度,可以连续测量 100 个周期,如果 $100T=198.7$ s,那么,一个周期为 1.987 s。可见,采用不同的测量方法,同时测量周期 T ,后一种测量方法的有效数字是四位,而前一种测量方法的有效数字只有两位。

(三) 关于有效数字的几点说明

(1) 在十进制中,有效数字与小数点的位置无关。如型钢的宽度为 12.35 cm,也可以表示为 0.123 5 m 或 0.000 123 5 km,它们的有效数字都是四位。

(2) 出现在数值中间的“0”和末尾的“0”都是有效数字。如用米尺测得一物体的长度为 1.068 0 m,此数值中间的“0”和末尾的“0”都是有效数字。其中末尾的“0”表示物体的末端与尺上的刻线“8”正好对齐,估读数为“0”,这个“0”不可随意丢弃。

(3) 表示特大数值与特小数值应采用科学记数法。特大数值与特小数值采用有效数字乘以 10 的幂指数来表示,称为科学记数法。一般规定在小数点前只取一位。如 369.5 m 用 mm 做单位时,应写为 3.695×10^5 mm,而不能写为 369 500 mm,因这样写扩大了原来的有效数字。又如 0.000 678 应写为 6.78×10^{-4} 。

(四) 有效数字的运算法则

总的原则是根据误差确定有效数字,即测量值和运算结果的有效数字的末位应和误差末位取齐。

1. 几个量相加减 设 y 为测量值 x_1, x_2, x_3, x_4 的和,即

$$y = x_1 + x_2 + x_3 + x_4$$

如 $x_1 = 19.6 \pm 0.2$, $x_2 = 28.15 \pm 0.1$, $x_3 = 6.748 \pm 0.001$, $x_4 = 0.3572 \pm 0.0002$, 则绝对误差 $\Delta_y = 0.2 + 0.1 + 0.001 + 0.0002 \approx 0.3$, $y = 19.6 + 28.15 + 6.748 + 0.3572 = 54.8552$ (加上画线者为含误差的数字)。

根据绝对误差 Δ_y 的有效数字,则 $y = 54.9 \pm 0.3$ 。

2. 几个量相乘除 设 y 为测量值 x_1, x_2 的积,即

$$y = x_1 \cdot x_2$$

如 $x_1 = 2.378 \pm 0.001$, $x_2 = 21.02 \pm 0.01$, 则 $y = 2.378 \times 21.02 = 49.98556$, 绝对误差为

$$\Delta_y = \left(\frac{0.001}{2.378} + \frac{0.01}{21.02} \right) \times 49.98556 \approx 0.04$$

根据绝对误差 Δ_y 可以确定 y 的有效数字,则 $y = 49.99 \pm 0.04$ 。

如果实验结果不需要计算误差,那么测量结果的有效数字只能按下列规则粗略确定:

(1) 几个量加减运算后的有效数字,其小数点后保留的位数应与诸量中小数点后位数最少的一个相同。

(2) 几个量乘除后的有效数字应与诸量中有效数字最少的一个相同。

3. 指定数或常数 在式中有指定数或常数的运算时, 应做以下处理:

(1) 将半径 r 化为直径 d 时, $d=2r$ 中出现的倍数“2”, 它是指定数而不是有效数, 因此在确定运算结果的有效数字时, 不必考虑它的位数。若 $r=4.17\text{ cm}$, 则 $d=2\times 4.17=8.34\text{ cm}$ 。

(2) 圆周长 $L=2\pi r$, 常数 π 的位数应取得与 r 的有效数字相同, 若 $r=1.375\text{ mm}$, 应取 $\pi=3.142$, 则得 $L=8.640\text{ cm}$, 运算中遇到其他常数 (如 g 、 h 、 e 等) 均可按此例取位数。

4. 对数函数 某数值 A 的对数 $\lg A$, 其定值部的位数 (即对数的小数位数) 应与数值 A 的有效位数相同。如 $A_1=6.805$, $\lg A_1=0.8328$; $A_2=68.05$, $\lg A_2=1.8328$ 。

5. 乘方与开方 某数值的乘方和开方的有效位数与其底 (即该数值) 的有效位数相同。如 $B_1=25.36$, 则 $B_1^2=643.1$; $B_2=36.87$, 则 $\sqrt{B_2}=6.072$ 。

以上函数运算, 在实验结果需计算误差的情况下, 还要遵循根据误差来决定其有效位数的原则, 其他函数 (如指数函数、三角函数) 也是如此。

四、列表法和作图法处理数据

实验中, 在记录和处理数据时, 常将数据列成表格。这样可以简明地表示有关物理量之间的关系, 便于检查测量结果和运算是否合理, 有助于发现和分析问题。作图法也是物理实验中处理数据常用的方法, 依据它可研究物理量之间的变化关系, 便于找出其中规律, 确定对应量的函数关系, 求得经验公式。用作图法处理数据的优点是直观、简便, 作出的图线对多次测量有取平均值的效果。

(一) 列表的要求

(1) 必须标明表中各符号所代表的物理量的意义, 并写明单位。单位应写在项目栏里, 不要重复记在各数值上。

(2) 表中所列数据要正确反映测量值的有效数字, 例如表 2-1-2。

表 2-1-2 测量金属电阻器的温度系数

次序	温度 $t/^{\circ}\text{C}$	电阻 R/Ω	次序	温度 $t/^{\circ}\text{C}$	电阻 R/Ω
1	10.5	10.42	4	60.0	11.80
2	29.4	10.92	5	75.0	12.24
3	42.7	11.32	6	91.0	12.67

(二) 作图的要求

1. 坐标纸 坐标纸有直角坐标纸 (毫米方格纸)、对数纸和极坐标纸等几种。可根据数据处理的需要选用坐标纸的种类和大小, 在大学物理实验中一般选用 $20\text{ cm}\times 25\text{ cm}$ 规格的直角坐标纸。

2. 图的名称 必须在图的左上角标明图的名称, 例如“ $I-U$ 图” (伏安特性图)。

3. 画坐标轴 在坐标纸上画两条粗细适当的线表示纵轴和横轴, 一般以横轴代表自变量。坐标轴上标明数值, 数值递增的方向也就明确了, 所以坐标轴不必再加箭头。

4. 坐标标度值

(1) 为避免图纸上出现大片空白而图线却偏于图纸一角的现象, 坐标标度不一定从“0”开始。

(2) 坐标标度值不必用有效数字表示。如坐标标度值只要写明 1、1.5、2、2.5、3 等, 而不必写成 1.000、1.500 等。

(3) 坐标轴的分度的估读数应与测量值的估计数(即有效数字的末位)相对应。

5. 表明物理量的名称、单位的符号 分别在纵、横坐标轴中部外侧表明物理量的名称及单位符号, 应沿坐标轴横写。

6. 标出数据的坐标点

(1) 测量数据点常用“+”符号标出, 并使交叉点正好落在数据的坐标上, 如果同一张图上要画几条图线, 则每条图线上的数据点分别用+、×、□等符号, 以示区别。

(2) 计算直线的斜率时, 图线上用△表示所选用的两个数据点, 而且应选用直线上相距较远的两点, 并注明其坐标(一般不取原来测出的坐标点)。

7. 描绘图线 连接直线或曲线时, 并非所有的数据都必须在直线上, 但是那些落在直线外的点应均匀对称, 合理地分布在线两侧, 必须用直尺或曲线尺绘制图线, 且线条要求细、匀、圆滑。

图 2-1-2 为根据数据作出的测定电阻温度系数的 $R-t$ 图线, 从图可见, $R-t$ 的函数关系是线性的, 即

$$R_t = R_0(1 + \alpha t) = R_0 + R_0 \alpha t$$

式中, R_t 为任一温度 t 时的电阻值, 截距 R_0 为 0°C 时的电阻值, $R_0 \alpha$ 则是电阻温度系数 α 与 R_0 的乘积。延长该直线得 $R_0 = 10.08\ \Omega$, 图线的斜率为

$$k = \frac{R_2 - R_1}{t_2 - t_1} = \frac{12.00 - 10.50}{67.0 - 15.0} = 0.0288 (\Omega \cdot ^\circ\text{C}^{-1})$$

金属电阻器的温度系数为

$$\alpha = \frac{k}{R_0} = \frac{0.0288}{10.08} = 2.86 \times 10^{-3} (^\circ\text{C}^{-1})$$

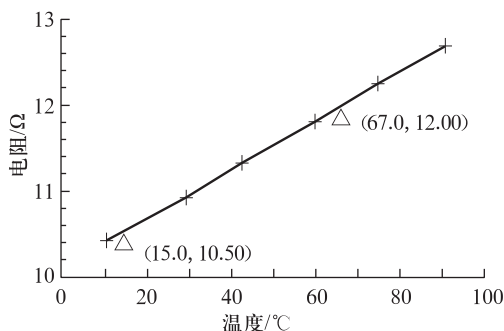


图 2-1-2 金属电阻器电阻与温度的关系

第二节 电学实验器件

一、物理实验室的电源

任何电学实验总离不开电源。电源是线路能量的供给者。实验室里常用的电源有交流电源和直流电源。

1. 交流电源 交流电源是电压（或电流）随时间周期性变化的电源。通常我们使用的市用交流电源频率为 50 Hz，单相电源电压为 220 V，三相电压的相间电压为 380 V。

低频信号发生器也是常用的交流信号电源，它的频率在数十赫到数百千赫范围内连续可调。这种电源能提供的电流不大，主要做标准频率使用。使用时要注意它的输出功率，切不可超过它的额定值，否则会损坏电源。

2. 直流电源 直流电源可分为两类：

(1) 经交流电整流而成的直流电源。包括实验室常用的各种晶体管稳压电源、低压电源、多用电源。它们的优点是使用方便，便于搬运，寿命也远比化学电池长。

(2) 化学电池。它是将化学能转变成电能的电源，分原电池及蓄电池两种。干电池、标准电池就属于原电池。

干电池的电动势为 1.5 V，内阻为 0.01~0.5 Ω 。随着使用时间的增加，它的内阻将会增大到 1 Ω 以上，电压降到 1.3 V 以下，此时就不能再使用了。

标准电池是一种电动势极为稳定的原电池，它只能作为电压的标准，而不能作为电能的供应者，使用时要特别小心。

蓄电池在充电时将电能转变为化学能，放电时又将化学能转变为电能。使用时，当电动势低于一定数值后，可以再行充电，电动势会恢复正常。蓄电池有酸蓄电池、碱蓄电池、镍镉电池、镍氢电池和锂电池之分。酸蓄电池（又称铅蓄电池）电动势是 2.1 V，内阻为 0.02~0.10 Ω 。碱蓄电池（又称铁镍蓄电池）电动势为 1.45 V，内阻在 0.1 Ω 以下。当酸蓄电池电动势降到 1.8 V、碱蓄电池电动势降到 1.2 V 时必须重新充电，否则会“累死”。镍镉电池可重复 500 次以上的充放电，非常经济，但有记忆效应。镍氢电池的能量密度约为镍镉电池的两倍，且操作电压与镍镉电池相近。以每一个单元电池的电压来看，镍氢与镍镉都是 1.2 V，而锂电池为 3.6 V，锂电池的电压是其他两者的 3 倍，并且同型电池的质量，锂电池与镍镉电池几乎相等，而镍氢电池比较重。可知，每一个电池本身质量不同，但锂电池因 3.6 V 高电压，在输出同等电压的情况下使得单个电池组合时数目可减少 1/3，而使成型后的电池质量和体积减小。镍氢电池与镍镉电池一样，都有记忆效应。因此，定期的放电管理也是必需的。相对而言，锂电池因为完全没有记忆效应，在使用上非常方便简单。它完全不必理会残余电压多少，直接可进行充电，充电时间自然可以缩短。自放电率方面镍镉电池为 15%~30%（月）；镍氢电池为 25%~35%（月）；锂电池为 2%~5%（月）。可见，镍氢电池的自放电率最大，而锂电池与其他两类电池相比自放电率极低。

3. 电源使用注意事项

(1) 使用电源时，首先要分清是直流电源还是交流电源，要考虑电源的输出电压、额定功率。如果实际输出功率大于额定功率就会损坏电源。

(2) 在接入直流电源前，一定要分清正、负极性。

(3) 任何电源都绝对不允许短路。

(4) 电学实验中, 在合上电源以前, 一定要仔细检查线路, 确实判明接线无误后, 经教师复查方可合上电源。操作过程发生故障, 必须立即断开电源, 查出原因后才可合上电源。实验完毕, 应先断电源, 后拆线路。

(5) 市用交流电源, 电压较高, 要注意人身安全, 各种仪器在接入市用交流电源以前, 要弄清仪器规定的输入电压是否符合要求。

(6) 蓄电池内装有酸或碱性溶液, 在使用和搬动时, 切忌电解液流出伤害人体和仪器。

二、电表

电表是测定电学参量的主要仪器之一。电表按工作原理可分为磁电式、电磁式、感应式、整流式、静电式、热电式、数字式等。按待测量名称可分为电流表、电压表、功率表、欧姆表等。

1. 电表的准确度等级及误差估算 电学测量中用到的各种仪表都有一定的环境条件(如温度、电场、磁场等)要求, 若条件不符, 测量结果就有误差, 这种误差叫作偏差误差。如果测量时符合仪器对环境条件的要求, 或进行读数修正, 偏差误差即可忽略。对指针式仪表, 由于表针与度盘之间有距离, 读数时会引入视差误差。为尽量减小这种误差, 应使视线保持与刻度盘垂直, 在附有刻度镜尺的度盘上, 应在看到指针与镜像重合的位置上读数, 这样读数误差可以减小到忽略不计。由于仪器本身结构不完善(如转轴摩擦、游丝质量不好、分度不准等)引起的误差叫仪器误差。仪器误差与仪器的准确度级别有关, 现说明如下:

各种电表按照误差大小分成 0.1、0.2、0.5、1.0、1.5、2.5、5.0, 共 7 个等级。仪器误差为

$$\Delta x_{(\text{仪})} = \text{电表量程} \times \text{电表等级}(\%)$$

例如, 用量程为 3 A 的电流表测量时, 表针示数为 2.26 A, 若所用电表为 1.5 级, 则

$$\Delta I_{(\text{仪})} = 3 \times 1.5\% = 4.5\% \approx 0.05(\text{A})$$

相对误差为

$$\frac{\Delta I}{I} = \frac{0.05}{2.26} \approx 2\%$$

如果其他误差忽略, 只考虑仪器误差, 读数结果可表示为

$$I = (2.26 \pm 0.05) \text{A}$$

2. 电表使用注意事项

(1) 根据测量的要求选择量程合适的电表。电表级别的选用应根据测量结果准确度的要求而定。

(2) 电表接入线路时, 对直流电表一定要注意它的正、负极性, 而交流电表一定要分清电表的适用频率, 电流表应串入被测电路中。

(3) 电流表内阻甚小, 必须先串联负载电阻再接电源, 严禁电流表与电源正、负极直接相连。电压表内阻较大, 接入电路测量电压时, 只要电源电压不大于电压表量程, 电压表可以与电源的正、负极直接相连, 而不会造成危害。

(4) 电表接入给测量结果带来的影响。每只电表有一定的内阻，电表接入线路后，将使原电路的参数发生变化，因而会给测量结果带来误差。这种因电表接入引起的误差称为接入误差，属于系统误差。例如，在用伏安法测量电阻的实验中，用电表测量电流和电压，显然可以采用两种不同的接线方法，如图 2-2-1 所示。

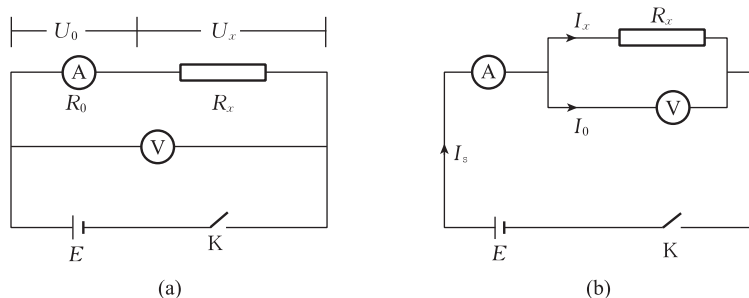


图 2-2-1 伏安法测电阻电路

(a) 电流表内接法 (b) 电流表外接法

现在估计电表接入引起的误差。设电流表的内阻为 R_0 ，待测电阻为 R_x 。对图 2-2-1(a) 所示的线路，电压表测量出的电压值是待测电阻 R_x 上的电压降与电流表内阻 R_0 上的电压降之和。即

$$U = U_0 + U_x$$

若此时电流表的读数为 I_x ，则有

$$\frac{U}{I_x} = \frac{U_0 + U_x}{I_x} = R_0 + R_x = R_x \left(1 + \frac{R_0}{R_x} \right)$$

可见，这时测得的并非是待测电阻值，而是待测电阻与电流表内阻之和。显然， R_0/R_x 就是电表的接入误差。如果 $R_x \gg R_0$ ，则 R_0/R_x 可以略去不计，也就是说电流表内接法适合于测量较大的电阻。只要知道电流表的内阻，就可以对测量结果进行修正。

在图 2-2-1(b) 中，电流表测量出的电流值并非是 R_x 上的电流 I_x ，而是 I_x 与流经电压表的电流值 I_0 之和。设电压表读数为 U_x ，则得

$$\frac{U_x}{I_s} = \frac{U_x}{I_x + I_0} = \frac{U_x}{I_x \left(1 + \frac{I_0}{I_x} \right)} \approx \frac{U_x}{I_x} \left(1 - \frac{I_0}{I_x} \right) = R_x \left(1 - \frac{R_x}{R_0} \right)$$

上式中 R_0 为电压表的内阻。显然， R_x/R_0 为电表接入误差。如果 $R_x \ll R_0$ ，接入误差就可以略去不计，即电流表外接法适合测量待测电阻阻值较小的情况。若已知电压表的内阻，就可对测量结果进行修正。

在其他线路中也应考虑电表接入对原电路的影响。

(5) 正确读数。测量前应将电表指针调到零刻线（即消除零差），若电表标尺上带镜子，应以指针与镜中的像重合时指针所指读数为准；若没有镜子，应以刀形指针侧面看去成一线时指针所指读数为准（即消除视差）。

有效数字的记录一般读到最小刻度的下一位。对于多量程电表，测量前应首先弄清所用量程每格代表的格值数即每格的大小，读数时，从标尺上读出格数（应估读一位），再乘以格值数。

对于数字显示的电表，直接记录，不估读。

3. 检流计的灵敏度及误差估算 精度较高的电学测量，常采用待测量与标准量比较的方法进行。如电桥法测电阻及电位差计。用比较法做电学测量时，除比较式仪器（包括电路）本身外，还必须有一个指示平衡位置的仪器，这就是检流计。检流计的作用是对测量变化引起的失衡电流有所指示。如果由于检流计灵敏度的限制，对失衡电流不能做出明显反应，就会引起误差。

最简单的检流计就是灵敏度较高（量程小）的微安表，可鉴别 10^{-8} A/格左右的电流。检流计的“0”刻度在表盘中央，刻度数值是从中央向两侧递增的，表针可向左或向右偏转。使用时根据偏转的方向和格数，做进一步调整。当调到平衡点时，检流计指针指“0”位。

灵敏度较高的检流计是悬线式检流计。该仪器的电流线圈和指针重量都由一条很细的金属丝负担，并处于悬挂状态，很容易摇摆晃动，不用时一定要拨动锁扣把指针和线圈锁住，以保护吊丝免被拉断。如果用小反光镜代替吊丝线圈上的指针，用反射光点代替指针指示，这就是光电反射式检流计。由于它是一种把吊丝装置的高灵敏度与光反射放大作用联合的检流计，具有较高灵敏度，可鉴别 10^{-9} A/格的电流。

比较式电学测量涉及的问题较多，并与选作比较标准量的精密级别有关。以下只讨论因检流计灵敏度造成的测量误差，为此，先定义检流计灵敏度。

设被测物理量变化为 Δx ，检流计偏转格数为 Δn ，则灵敏度 S 定义为

$$S = \Delta n / \Delta x$$

S 在数值上等于被测物理量发生单位变化时检流计偏转变化的格数。如果规定 $\Delta n = 0.1$ 格时是可以辨认的，则由检流计决定的误差为

$$\Delta x = 0.1 / S = 1 / (10S)$$

例如，用电桥测电阻时，当电阻变动 0.1Ω ，检流计指针变动 5 格，则

$$S = \Delta n / \Delta x = 5 / 0.1 = 50 (\Omega^{-1})$$

$$\Delta R = \Delta n / S = 0.1 / 50 = 0.002 (\Omega)$$

使用指针式检流计要注意：

- (1) 检流计要避免剧烈震动，以免损坏悬丝。
- (2) 检流计不用时，应将指针止动，即让线圈短路，用时再将指针启动，并调节到平衡点即零位置。
- (3) 在电路未达到平衡前，必须接入一个保护电阻，以免过载而损坏检流计，当接近平衡时，再将保护电阻减小到零。

三、电阻

电阻是电路中最基本的元件之一，它的型号、规格、品种都很多，这里仅介绍与电学实验有关的电阻。

1. 固定电阻 固定电阻包括碳膜电阻、碳质电阻、金属膜电阻、绕线电阻等，它们都大量用于电子仪器、仪表中。另外，标准电阻也是一种固定电阻，它是用温度系数极小的金属丝双线并绕而成，通常用作测量和校准。

2. 可变电阻 可变电阻包括滑线变阻器、电阻箱、电位器等。电学实验中用得最多的是滑线变阻器和电阻箱。

电阻箱按结构可分为插头式及旋转式两种。图 2-2-2 是插头式电阻箱结构原理，电阻丝的两端分别与铜块相接，当将插头插进两铜块中间时，该两铜块间的那个电阻即被短路（图 2-2-2 中的 R_2 ），而没有被短路的那些电阻（图中的 R_1 和 R_3 ）仍起作用。由于各分立电阻的串联关系，故电阻箱的阻值应为拔出插头后的电阻之和。每个插头对应的电阻都刻在靠近插孔的铜块上，把拔掉插头的电阻值加起来，就是电阻箱接入电路的电阻值。

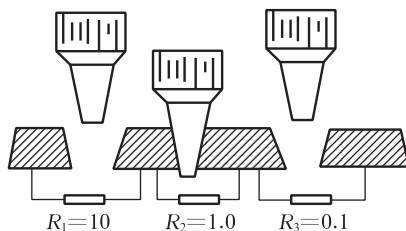


图 2-2-2 插头式电阻箱

旋转式电阻箱的结构原理如图 2-2-3 所示，它由几个转盘式电阻串联组成，各转盘电阻后者依次为前者的 $1/10$ 或 10 倍。每个转盘电阻又分成 9 等份，在面板上标有 $0 \sim 9$ 共 10 个挡及 $\times 0.1$ 、 $\times 1$ 、 $\times 10$ 等乘数。对准标线（箭头或标点）的转盘数字与乘数之积，即为该转盘的电阻值。图 2-2-3 中，电阻值 $R = 22.2 \Omega$ 。电阻箱电阻误差由仪器准确度等级决定，电阻箱按误差大小分为 0.02、0.05、0.1、0.2 共 4 个等级，它们表示的是电阻值的相对误差百分数，例如 0.1 级表示当电阻为 2360.6Ω 时，其误差为 $2360.6 \times 0.1\% = 2.3606 \approx 2.4(\Omega)$ 。

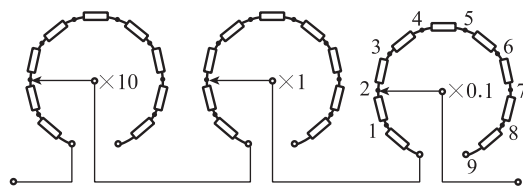


图 2-2-3 旋转式电阻箱

不同级别的电阻箱，允许的接触电阻也不相同，例如 0.1 级电阻箱，规定每个旋钮的接触电阻不大于 0.002Ω 。这个电阻本身并不算大，但当测小电阻、旋钮较多时，其影响则不可忽视。为了减小这方面的影响，有的电阻箱增加旋钮（如 $\times 1$ 及 $\times 0.1$ 挡）专用接头，这样，用小电阻旋钮时就可避免大电阻旋钮引起的接触电阻误差。

级别误差和接触电阻误差之和就是电阻箱的误差。例如，在 0.1 级、6 旋钮的电阻箱内取 10Ω 的电阻时，其级别误差、接触误差、总误差分别是

$$\Delta R_{(\text{级})} = 10 \times 0.1\% = 0.01(\Omega)$$

$$\Delta R_{(\text{接})} = 6 \times 0.002 = 0.012(\Omega)$$

$$\Delta R = 0.01 + 0.012 \approx 0.02(\Omega)$$

各种电阻都有两个重要的电参数：全电阻和额定电流。全电阻是指电阻的总阻值，额定电流（也有称为额定功率）表示电阻允许通过的最大电流。电阻在使用时，不允许超过这一

数值，否则电阻将被烧坏。正确使用电阻就是要根据电路要求计算出全电阻和额定电流，选用合适的电阻。

[附] 基础知识作业

大学物理实验基础知识作业

院系名称 _____ 时 间 _____
学 号 _____ 姓 名 _____

基础知识 1 误差与有效数字

1. 测量某电阻器的阻值，共测量 5 次，所得的数值分别为 $4.89\ \Omega$ 、 $4.86\ \Omega$ 、 $5.03\ \Omega$ 、 $4.87\ \Omega$ 、 $5.00\ \Omega$ ，试求这些数据的平均值和不确定度，并写出结果表达式。

2. 用米尺测量正方形某一边的长，5 次测量结果分别为 $4.00\ \text{cm}$ 、 $4.01\ \text{cm}$ 、 $4.04\ \text{cm}$ 、 $3.98\ \text{cm}$ 、 $3.97\ \text{cm}$ ，求正方形面积的平均值和不确定度，并写出结果表达式。

3. 一个铅制圆柱体测得其直径 $d = (2.04 \pm 0.01)\text{cm}$ ，高 $h = (4.12 \pm 0.01)\text{cm}$ ，质量 $m = (149.10 \pm 0.05)\text{g}$ 。

(1) 计算铅的密度。

(2) 计算铅密度的相对误差和不确定度，并写出结果表达式。

4. 已经测得金属棒的电阻 $R = (4.93 \pm 0.04) \times 10^{-4}\ \Omega$ ，长 $L = (38.23 \pm 0.01) \times 10^{-1}\ \text{m}$ ，直径 $d = (4.043 \pm 0.003) \times 10^{-3}\ \text{m}$ 。

(1) 计算电阻率的平均值。

(2) 计算电阻率的相对误差和不确定度，并写出结果表达式。



5. 写出下列测量公式的相对误差表达式。

$$(1) f = \frac{uv}{u+v}$$

$$(2) f = \frac{l^2 + e^2}{4l}$$

$$(3) V = \frac{\pi D^3}{6}$$

$$(4) Y = \frac{4FLR}{\pi d^2 D l}$$

6. 按照误差理论和有效数字的运算法则，改正以下错误。

(1) 某组测量结果表示为

$$d_1 = (10.800 \pm 0.02) \text{ cm}, d_2 = (10.80 \pm 0.002) \text{ cm},$$

$$d_3 = (10.8 \pm 0.002) \text{ cm}, d_4 = (10.8 \pm 0.02) \text{ cm}$$

$$(2) D = (2\,700 \pm 1\,000) \text{ km}$$

$$(3) L = 30 \text{ cm} = 300 \text{ mm}$$

$$(4) t = (8\,050 \pm 4.5) \text{ s}$$

$$(5) 0.022\,1 \text{ m} \times 0.022\,1 \text{ m} = 0.000\,484\,1 \text{ m}^2$$

7. 完成以下单位变换。

$$m = (2.395 \pm 0.001) \text{ kg} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ g} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ mg} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ t}$$

8. 按有效数字运算法则计算下列各式结果。

$$(1) 86.852 \pm 2.6$$

$$(2) 105.50 - 3.5$$

$$(3) 111 \times 0.100$$

$$(4) 240.5 \div 0.10$$

分 数	
指导教师	



大学物理实验基础知识作业

院系名称 _____ 时 间 _____
学 号 _____ 姓 名 _____

基础知识 2 电学实验器件

1. 要测 1 A 的电流，试比较以下 3 种情况测量质量的优劣（由相对误差大小决定）：
①量程 3 A，级别 1.0 级；②量程 1 A，级别 2.5 级；③量程 1.5 A，级别 1.5 级。总结
由此得出的在使用电表时选择合适量程的电表的方法。计算 3 种情况下电表测量的误差。

2. 电阻箱量程为 $9\,999\,\Omega$ ，准确度等级为 0.1 级，若测量中电阻箱示值为 $150\,\Omega$ ，则
测量结果的误差是多少？写出测量结果的标准式。



3. 一般电阻箱的额定功率是 0.25 W ，若电源电压为 10 V ，电阻箱上的旋钮至少要调为多少欧姆才算安全？

分 数	
指导教师	



3 第三章

基础实验

实验 1 长度测量

一、实验目的

1. 掌握游标卡尺、螺旋测微器的工作原理及使用方法。
2. 学习有效数字的运算法则和用不确定度表征数据的随机误差。

二、实验仪器

米尺、游标卡尺（卡尺）、螺旋测微器（千分尺）、读数显微镜、待测件。

三、仪器介绍及测量原理

（一）游标卡尺

用普通米尺测量长度，一般只能准确到毫米，毫米以下就要靠估读了。为了提高读数的精度，在原刻度尺（主尺）旁边附上一个可以滑动的小刻度尺（副尺），具有这种结构的尺叫作游标卡尺。

最简单的游标卡尺是把主尺上 9 个最小分格的长度分成 10 个分格刻在副尺（游标）上，如图 3-1-1 所示。如果主尺的最小分格长度是 1 mm，副尺上的分格就是 0.9 mm，主尺最小分格与副尺最小分格长度之差为 $\Delta l = 0.1 \text{ mm}$ 。

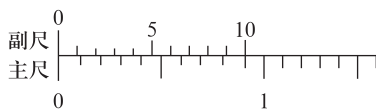


图 3-1-1 游标卡尺原理

由于副尺与主尺的最小分度值相差 0.1 mm，故当副尺的 0 刻线与主尺的 0 刻线刚好重合时，副尺的第 1 刻线与主尺的第 1 刻线必相差 0.1 mm，而副尺第 2 刻线与主尺第 2 刻线相差 0.2 mm。同理，主、副尺的第 n 刻线将相差 $n/10 \text{ mm}$ 。反之，如果副尺右移 0.1 mm，副尺第 1 刻线将与主尺刻线重合；副尺右移 0.2 mm，副尺第 2 刻线与主尺刻线重合；副尺右移 $n/10 \text{ mm}$ ，副尺的第 n 刻线必与主尺的某一刻线重合。由此可知，副尺的第 n 刻线与主尺刻线重合，就表示副尺右移了 $n/10 \text{ mm}$ ，把这个尾数与主尺上直接读出的大数（毫米的整数部分）相加，就是被测物体 AB 的长度了。如图 3-1-2 所示，从主尺上读到的大数（以游标 0 线为读数标线） $AC = 1.10 \text{ cm}$ ，再由副尺第 3 刻线与主尺 D 刻线重合而读的小数部分 $BC = 0.30 \text{ mm}$ 。于是

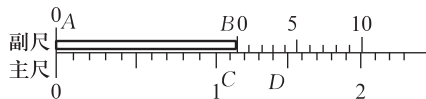


图 3-1-2 游标卡尺的读数

$$AB = AC + BC = 1.1 + 0.030 = 1.130(\text{cm})$$

上述数值中的 3 是根据游标上刻线与主尺某刻线重合而读得的，不是估计值，故后边应

加 0，表示 3 这一位是可靠数字，误差则在其后一位上。

以上是最简单的游标分度，还有游标为 20 分格（相当于主尺 19 格）、50 分格（相当于主尺 49 格）的等。设 m 为游标上的分格数， n 为刻线重合时的游标读数，则该游标的测量读数为

$$L = k \cdot \Delta x + \frac{n}{m} \cdot \Delta x \quad (3-1-1)$$

Δx 是主尺上最小分格的长度， k 是测量时直接从主尺上读的整数（最小分度格数）。

图 3-1-3 是副尺为 20 分格（ $m=20$ ）、主尺最小分格为 $\Delta x=1.0 \text{ mm}$ 的游标卡尺。设从主尺上读得的 $k=15$ ，游标的第 5 线与主尺划线重合，即 $n=5$ ，代入式 (3-1-1)，求得测量值为

$$L = 15 \times 0.1 + (5/20) \times 0.1 = 1.525 (\text{cm})$$

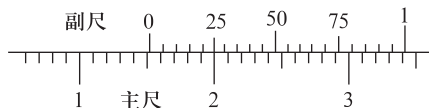


图 3-1-3 1/20 的游标卡尺

实际上，尾数都直接标在副尺刻度线上，如重合的第 5 刻线上就注有“25”字样，即 0.25 mm，故无需计算便可直接读出 $L = 1.5 + 0.025 = 1.525 (\text{cm})$ 。

必须注意，游标的每一分格代表的是 0.05 mm，切勿认为是 0.01 mm。例如，当图 3-1-3 中游标的下一格（即 $n=6$ ）重合时，应读作 $1.525 + 0.005 = 1.530$ ，不可误读为 $1.525 + 0.001 = 1.526$ 。

游标卡尺是靠主、副尺刻线的重合程度读数的，可准确到主、副尺最小分度之差 Δl 。如果以 m 代表副尺分格数，则 Δl 就是主尺最小分度值 Δx 的 $1/m$ ，即 $\Delta l = \frac{\Delta x}{m}$ 。在实际测量中，主尺与副尺刻线不可能正好对齐，读数时要根据判断取值，因而如图 3-1-4 估读数字必产生误差。如图 3-1-4(a) 所示，游标上的 0、1 两刻线刚好对称地落在 7、8 两刻线中间，由于游标上两刻线与主尺上两刻线靠近的程度一样，读数时，一种可能的情况是按主尺 7 刻线与游标 0 刻线对齐读数，读为 7.00 mm；再一种可能情况是按副尺的 1 与主尺的 8 对齐读数，读作 7.10 mm。显然，更为精确的读数应是 7.05 mm，故前面两种估计读数都有 $\Delta l/2$ 的偏差。如果游标的 0、1 刻线不是刚好落在主尺 7、8 刻线的正中央，而是稍微偏右（或偏左）一点，如图 3-1-4(b) 所示，读数时就认为游标的 1 与主尺的 8 对齐的程度最好，读作 7.10 mm，该读数误差已小于 $\Delta l/2$ 。由此可见，游标卡尺的误差不大于 $\Delta l/2$ 。

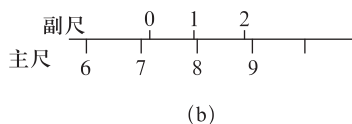
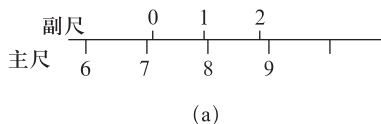


图 3-1-4 估读数字

游标卡尺外形如图 3-1-5 所示，测物体的长度和外径时，用右手抓住主尺，拇指压小轮 D 并推动小轮前移，使测爪 A、B 卡住被测物体后读数，测内长或内径时用测爪 A'、B' 与物体接触后读数，C 端可用于测量容器深度，E 是游标固定螺钉。

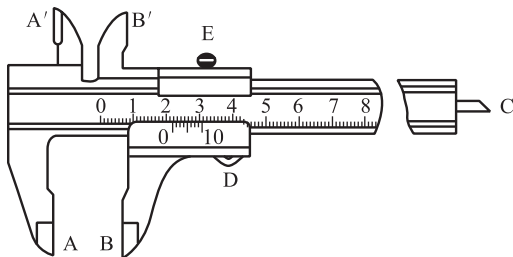


图 3-1-5 游标卡尺

(二) 螺旋测微器

仪器结构如图 3-1-6 所示, S 是一根带精密螺纹的测杆, 它同副尺刻度圆筒以及转柄 F 固定在一起, 与螺旋测杆密合的套管 M 与支架 H 固定连接在一起, M 上有主尺刻度, 横线以上和横线以下的刻度间距都是 1 mm, 相邻上下刻线之间的距离是 0.5 mm, 测杆上的螺距是 0.5 mm, 故测杆每转一周, A、B 间的距离变动 0.5 mm。副尺刻度把圆筒 F 分划成 50 格, 每个间距代表 $0.5/50=1/100(\text{mm})$ 。

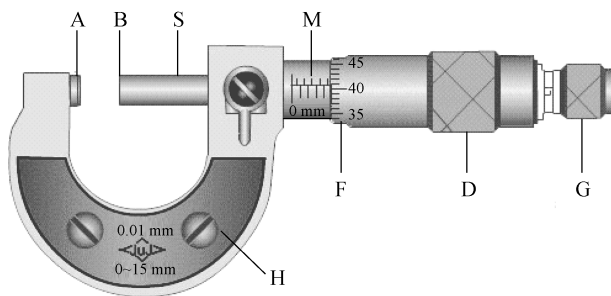


图 3-1-6 螺旋测微器

测量时将待测物体放在 A、B 之间, 转动棘轮 G, 使待测物与 A、B 端接触, 直到 G 开始滑动, B 端不再前进为止, 从主尺 M 上读到大于 0.5 mm 的数, 再从副尺 F 上读出小于 0.5 mm 的数, 二者相加, 即为测量值。图 3-1-6 中的读数应为

$$4 + 0.5 + 0.408 = 4.908(\text{mm})$$

在使用螺旋测微器时, 只允许转动可滑动的 G, 特别是当测杆 B 端靠近和接触待测物体时, 更要严禁转动 D; 否则, 不但会影响测量结果, 还会损坏仪器精度。当 A、B 端与待测物体即将接触时, 应放慢 G 的转速, 避免因冲击力影响读数。当 A、B 端空接触 (即 A、B 间无待测物体) 时, 副尺 0 应与主尺横线对齐, 即空读数 $d_0=0$ 。若 $d_0 \neq 0$, 待测长度应为实际读数 d 减去空读数 d_0 。

从主尺读取大数是以该分度是否从副尺轮 F 边缘露出作为依据的。实际上, 当副尺 0 线很靠近主尺横线时, 单从主尺上看靠近副尺边缘的那个刻线是否已露出是非常困难的, 这时可用参考副尺刻度的办法判定。如图 3-1-7(a) 所示, 若副尺读数较小, 即表示刻

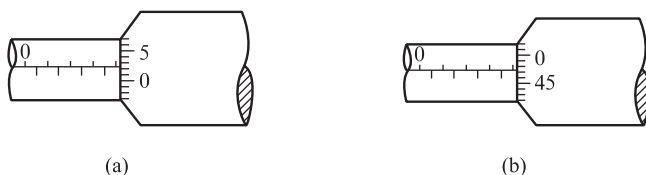


图 3-1-7 螺旋测微器的读数

(a) 读数 4.025 (b) 读数 3.975

线已露出, 主尺应读到 4 mm; 若副尺读数较大, 如图 3-1-7(b) 所示, 就是没露出, 主尺只能读到 3.5 mm。

(三) 读数显微镜

这是一种较精密的测量仪器, 准确度与螺旋测微器相同, 即能准确到 0.01 mm, 估读到 0.001 mm。但读数显微镜可对被测物进行非接触测量, 这是螺旋测微器无法做到的, 图 3-1-8 是读数显微镜的结构示意图, 其各部分的名称及功能如下: 目镜 (1), 上下移动可使叉丝清晰; 目镜及叉丝套筒 (2), 上下移动可改变镜筒长度及放大倍数, 亦可兼做细调用; 镜筒 (15) 及镜筒固定螺旋 (14), 放开镜筒固定螺旋, 使镜筒上下移动可改变其高度, 有看清被测物体的作用; 副尺轮转柄 (5), 用右手食指及拇指捏住该柄转动, 即可从目镜中看到叉丝移动并进行测量; 主尺刻度 (7) 及副尺刻度 (6), 刻度附近有读数标线 (3 和 4), 主、副尺读数相加即为测量读数; 镜架调节和固定螺丝 (8), 放开后镜架可移动或转动, 调

整镜筒竖直,且正好对准观察目标;物镜(9);载物台(10);视场照明灯泡或反光板(11);镜架高度调整和固定螺钉(12);基座(13)。

现以测量小球的直径为例,说明仪器的调整和使用方法。

第一,转动副尺轮使主尺读数标线指在主尺刻度中部附近,打开照明灯,放开螺钉(12),调镜架,使镜筒竖直,视场最亮。

第二,将带有小孔的金属板放在载物台上物镜的下方;调节目镜(1)至看清叉丝,再调节镜筒(15)(上下移动)至能看到小圆孔,并使小圆孔周界清晰可见,叉丝交点基本落在小孔中心处,如图3-1-9(a)所示。

第三,转动副尺轮使叉丝纵线离开小孔少许,如图3-1-9(b)所示,然后缓慢转动副尺轮,使纵线与小孔右边缘相切(相切即可,勿转过再后退),如图3-1-9(c)所示,记下主副尺读数 $d_{\text{右}}$;继续同方向转动副尺轮,再使纵线与小孔左边相切,如图3-1-9(d)所示,记下读数 $d_{\text{左}}$ 。两次读数相减即为待测圆孔直径。

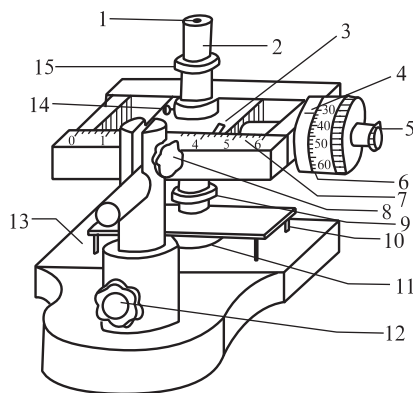


图 3-1-8 读数显微镜

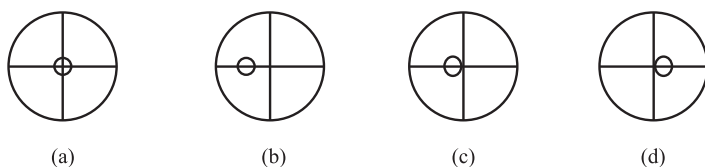


图 3-1-9 测量小球直径

为避免螺旋空程造成误差,测量时要严格向同一方向转动副尺轮,使十字叉丝相切,切勿忽而正转,忽而反转,且要在被测物图像边缘清晰可见时才能读取数据,否则误差较大。此外,要正确读取主副尺上的数字。图3-1-10是一般情况下的读数例子,读数为 $4.4+0.0348=4.4348$ 。图3-1-11及图3-1-12是主尺标线与某一刻线几近对齐、难以辨认的情形,一定要参考副尺,正确读取数据。

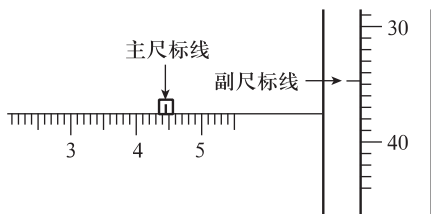


图 3-1-10 一般情况下的读数

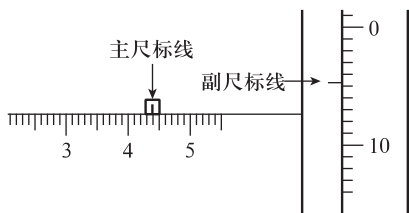


图 3-1-11 副尺上读数为正

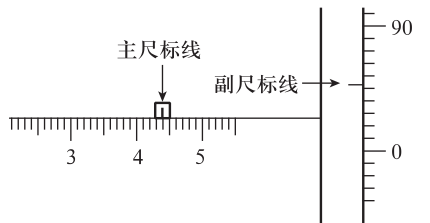


图 3-1-12 副尺上读数为负

四、实验内容

- (1) 检查并记录游标卡尺及螺旋测微器的零点读数（空读数）、量程、分度值和最小估读值。
- (2) 用米尺、游标卡尺和螺旋测微器分别测量矩形板的长度、宽度和厚度。
- (3) 用游标卡尺和螺旋测微器测量大头钉、小钢球的直径。

五、数据处理

按照本章后所附实验报告中数据处理要求填写。

实验 2 谐振动的研究

一、实验目的

1. 利用弹簧振子研究谐振动的规律。
2. 验证周期公式 $T=2\pi\sqrt{\frac{m}{K}}$ 。

二、实验仪器

DH-GLB-II 焦利氏秤实验仪（图 3-2-1）、物理天平、砝码。

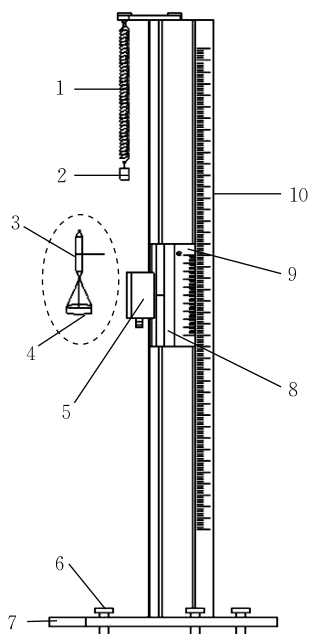


图 3-2-1 DH-GLB-II 焦利氏秤实验仪

1. 弹簧 2. 弹簧振子 3. 配重砝码组件（含指针） 4. 砝码盘 5. 霍尔开关组件 6. 水平调节螺丝 7. 底座 8. 反射镜 9. 游标 10. 立柱

三、实验原理

谐振动虽然是振动中最简单的一种运动形式，但它可以作为表征其他周期运动的重要特征的理想模型。我们知道，物体在一个大小正比于物体离开平衡位置的位移 x ，而方向始终指向平衡位置的力 $F=-Kx$ 的作用下，物体做简谐振动。例如，弹簧振子的振动即为简谐振动。

如果不考虑弹簧本身质量，只计算弹簧下端负荷的质量 m ，并且忽略阻力，则弹簧振子的运动规律可表述为

$$F=ma=m \frac{d^2x}{dt^2}=-Kx$$

即

$$\frac{d^2x}{dt^2}+\omega^2x=0 \quad (3-2-1)$$

其中, $\omega^2=K/m$, K 为弹簧的劲度系数, m 为弹簧下端负荷的质量, ω 为圆频率, 它和周期 T 的关系为

$$T=\frac{2\pi}{\omega}$$

即

$$T=2\pi\sqrt{\frac{m}{K}} \quad (3-2-2)$$

由式 (3-2-2) 可知, 对于一定的弹簧, 弹簧振子的周期 T 与负荷质量的平方根成正比。

对于式 (3-2-2), 是在负荷质量不大、振幅很小、弹簧近似地看作无阻力的情况下才成立的, 但在一般情况下弹簧的相当质量不容忽略, 因此式 (3-2-2) 应修正为

$$T=2\pi\sqrt{\frac{m+m_0}{K}} \quad (3-2-3)$$

其中, m_0 为弹簧的相当质量, 即弹簧的质量 m_s 对振动周期的影响相当于在弹簧下端附加了一个质量为 m_0 的负荷, 有

$$m_0=\frac{1}{3}m_s$$

四、实验内容

1. 测定弹簧的劲度系数

(1) 将水平泡放置在底板上, 调节底板上的 3 个水平调节螺丝, 使焦利氏秤立柱垂直。

(2) 在立柱顶部横梁挂上挂钩, 再依次安装弹簧、配重砝码组件以及砝码盘。

(3) 调整游标尺的位置, 使指针与游标尺左侧的基准刻线以及指针像重合, 记下游标尺上的读数 L_1 。在砝码盘中放入 500 mg 砝码, 再调整游标尺的位置, 使指针与游标尺左侧的基准刻线以及指针像重合, 记下游标尺上的读数 L_2 。这样弹簧在砝码的作用下伸长量为 $\Delta L=L_2-L_1$, 根据胡克定律, 由式 $K=\frac{mg}{\Delta L}$ 可以计算出劲度系数 K 。

(4) 此后, 再增加 2 次砝码, 每次增加 500 mg, 分别求出相应的 K , 最后求出 3 次所得 K 的平均值, 记录测量和计算得出的数据。

2. 测定弹簧振子的周期

(1) 取下弹簧下端的砝码盘和配重砝码组件, 将弹簧振子挂入弹簧下端。

(2) 将霍尔开关组件装在镜尺的左侧面, 霍尔元件朝上, 接口插座朝下, 再把霍尔开关组件通过专用连接线与多功能计时器的传感器接口相连。

(3) 开启计时器电源, 仪器预热 5~10 min。

(4) 上下调节游标尺位置, 使霍尔开关与弹簧振子间距约 4 cm, 且弹簧振子中心位置与霍尔开关敏感中心正面对准, 以确保弹簧振子底部磁钢在振动过程中有效触发霍尔开关。

(5) 设定计时器计数次数, 向下垂直拉动砝码, 使弹簧振子底部贴近霍尔开关, 此时计时器信号指示灯变暗; 然后松开手, 让弹簧振子上下振动, 此时信号指示灯将闪烁。待弹簧

振子振动稳定后,按下计时器执行开关开始计时,直到20次完全振动结束。然后再重复2次,分别求出相应的周期,取3次测量的平均值即可得出振动周期,记录测量和计算得出的数据。

(6) 用天平分别称量弹簧振子和弹簧的质量,并将测量的弹簧的劲度系数分别代入式(3-2-2)和式(3-2-3),计算出周期并记录,再与测出的振动周期进行比较,验证公式。

3. 注意事项

- (1) 弹簧切勿用大力拉,以免变形。
- (2) 拉弹簧时要在竖直方向轻轻拉动,不要让弹簧摆动。

五、数据处理

按照本章后所附实验报告中数据处理要求填写。

六、扩展阅读

振动的危害与应用

振动是技术科学中广泛存在的物理现象,如建筑和机器的振动、无线电技术和光学中的电磁振动、控制系统和跟踪系统中的自激振动等。这些表面上看起来不同的现象,都可以通过数学振动方程统一到振动理论中来。振动理论与相关技术已经广泛应用于采矿、冶金、煤炭、石油化工、机械、水利、电力、土木建筑、建材、铁路与公路交通、轻工与食品、农业、生物、信息、医疗等许多领域。

地基振动是一种常见的振动现象,实际中为了减小地基振动的不良影响,以保证仪器设备的正常工作,对生产现场的精密仪器和设备通常需要采用隔振措施。常用的隔振器有钢丝绳、钢丝网、金属橡胶等。

洗衣机在正常工作时非常平稳,当切断电源后,发现洗衣机先是振动越来越剧烈,然后振动再逐渐减弱。这是因为正常工作时,洗衣机波轮的运转频率比洗衣机的固有频率大;洗衣机切断电源,波轮的转动逐渐慢下来,在某一小段时间内洗衣机发生了强烈的振动,说明此时波轮的频率与洗衣机固有频率相同,发生了共振;此后波轮转速减慢,则波轮运转频率小于洗衣机固有频率,所以共振现象消失,洗衣机的振动随之减弱。

共振的危害相当大,可以造成机器损坏、桥梁倒塌、翻船、雪崩等事故。

机器在工作时由于零部件的运动也会产生周期性的策动力,使机器因共振而受到损坏。为了避免共振,设计时要注意机器的转速,使机器的固有频率不与策动力的频率接近。机床运转时,运动部分总会有某种不对称性,从而对机床的其他部件施加周期性作用力,引起这些部件的受迫振动,当这种作用力的频率与机床的固有频率接近或相等时,会发生共振,从而会影响加工精度,加大机械钢铁的疲劳破坏,加大机械的损害力度。

1940年,美国建成了全长860m的Tacoma悬索桥,然而4个月后,该桥却因大风引起的共振而塌毁,尽管当时的风速还不到设计风速限值的1/3。因为这座大桥实际的抗共振强度没有过关,所以导致事故的发生。每年肆虐于沿海各地的热带风暴,也借助共振造成危害,使得房屋和农作物饱受摧残。因为风除了产生沿着风向的一个风向力外,还会对风区的构筑物产生一个横力,而且风在表面的漩涡在一定条件下产生脱落,从而对构筑物产生一个

振动。当风的横力产生的振动频率和构筑物的固有频率相同或者相近时，就会产生风荷载共振。

在冰山雪峰间，动物的吼叫声引起空气的振动，当频率等于雪层中某一部分的固有频率时，会发生共振，形成雪崩，因此，登山队员严禁高声说话。

轮船在航行时，会受到周期性的波浪冲击而左右摇摆。如果波浪冲击力的频率与轮船的固有频率相同，就会发生共振，摆幅增大，甚至可以使船倾覆。这时可以改变船的航向和速度，使波浪冲击的频率远离船的固有频率。

共振并不是一无是处，很多时候人们会利用共振。

乐器的共鸣箱利用的就是共振原理。钢琴、提琴、二胡等乐器的木制琴身，就是利用了共振现象使其成为共鸣箱（盒），将优美悦耳的音乐发送出去，以提高音响效果。

电磁共振在生活与生产中都有很多的应用，特别是在无线电技术中，收音机的调谐装置就是利用了电磁共振现象，以接收某一频率的电台广播。电台通过天线发射出短波/长波信号，收音机通过将天线频率调至和电台电波信号相同频率来引起共振，将电台信号放大，再经过过滤后传至喇叭发声。

国外正在研制一种武器，它不用子弹、炮弹，也不用激光，而是以声波做“子弹”来杀伤敌人，这就是次声武器。当次声武器发出的次声波频率同人体肌肉、内脏器官的固有频率吻合时，能引起肌肉及内脏器官的共振，使人的五脏六腑破裂，导致死亡。

实验 3 用拉伸法测金属丝的杨氏模量

任何固体在外力作用下，都要发生形变。当外力不超过某一限度时，撤去外力后，形变能随之消失，这种形变称为弹性形变。外力过大时，形变不能全部消除，留有剩余的形变，称为塑性形变。发生弹性形变时，物体内部产生恢复原状的内应力。各种不同的弹性模量是反映材料所发生的形变与相应内应力关系的物理量，是工程技术中常用的参数。

一、实验目的

1. 学习用拉伸法测定杨氏模量。
2. 掌握用光杠杆及望远镜尺组测量微小长度变化的原理和方法。
3. 学习用逐差法测量数据。

二、实验仪器

杨氏模量测定仪、米尺、螺旋测微器。

三、实验原理

最简单的形变是棒状物体受力的伸缩。设一根粗细均匀、原长度为 L 、横截面积为 S 的金属棒（丝），沿长度方向受外力 F 的作用伸长了 ΔL 。其单位长度的伸长量 $\Delta L/L$ 称为应变，单位横截面上所受的外力 F/S 称为应力。根据胡克定律，在弹性限度内，物体所受的应力与所产生的形变成正比，即

$$\frac{F}{S} = E \frac{\Delta L}{L} \quad (3-3-1)$$

式 (3-3-1) 中比例系数 E 称为杨氏弹性模量（简称杨氏模量），在国际单位制中 E 的单位是 $\text{N} \cdot \text{m}^{-2}$ 。杨氏模量是描述固体材料抵抗形变能力的重要物理量，不同材料具有不同的杨氏模量（表 3-3-1），因此测定杨氏模量是了解材料特性的一种手段。

表 3-3-1 几种材料的杨氏模量

材料	钢	铜	铝	玻璃	硬木	骨头沿轴	血管
$E/(\text{N} \cdot \text{m}^{-2})$	20×10^{10}	12×10^{10}	7×10^{10}	5.5×10^{10}	1.0×10^{10}	1.6×10^{10}	2.0×10^5

当施于棒的作用力改变 Δf 时，其棒的伸长量亦改变 Δl ，则由式 (3-3-1) 可得

$$\frac{F + \Delta f}{S} = E \frac{\Delta L + \Delta l}{L}$$

由此可得到

$$\frac{\Delta f}{S} = E \frac{\Delta l}{L}$$

即

$$E = \frac{\Delta f / S}{\Delta l / L}$$

设金属丝直径为 d ，则其截面积为 $S = \pi d^2 / 4$ ，将其代入上式，整理得

$$E = \frac{4L}{\pi d^2} \frac{\Delta f}{\Delta l} \quad (3-3-2)$$

一般情况下，在弹性限度内， Δl 是很小的，很难用普通量具（如钢直尺、游标卡尺）将它测准。因此，测定杨氏模量的装置都是围绕如何测准伸长量 Δl 而设计的。测量微小伸长量可采用螺旋测微器、读数显微镜、光杠杆放大法、光学干涉法等。本实验采用光杠杆法来测定金属丝受力后的微小伸长量。

光杠杆系统包括光杠杆 M、水平放置的望远镜 T 和竖直标尺 J。在三足底板（支架）上立一平面镜，构成一个光杠杆，如图 3-3-1 所示。测量时平面镜垂直于光杠杆的底座，两个前足尖放在仪器平台的沟槽内，一个后足尖（称测量足）立于夹有金属丝的 R 夹上。当待测金属丝受力 Δf 伸长时，R 夹（连同光杠杆的后足尖）在平台 C 的孔中向下移动 Δl ，相应的平面镜也转过一个角度 θ 。在稍远处置一竖直标尺和测量望远镜，从望远镜中可读出待测金属丝伸长前后叉丝横线对准竖尺像上的刻度读数 n_1 和 n_2 。令 $x = |n_2 - n_1|$ ，根据光的反射定理，镜面旋转角 θ ，反射线将旋转 2θ 角，由图 3-3-2 可知：

$$\tan 2\theta = \frac{x}{B}$$

当 θ 很小（即 $x \ll B$ ）时，有 $\tan 2\theta \approx 2\theta$ ，又因为 $\theta \approx \Delta l / D$ ，所以

$$\Delta l = \frac{D}{2B} x \quad (3-3-3)$$

这样就把微小伸长量的测量转化为 x （即 n_1 、 n_2 ）的测量。我们把 x 与 Δl 之比称为光杠杆的放大倍数 β ，即

$$\beta = \frac{x}{\Delta l} = \frac{2B}{D} \quad (3-3-4)$$

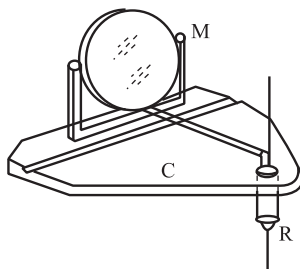


图 3-3-1 光杠杆

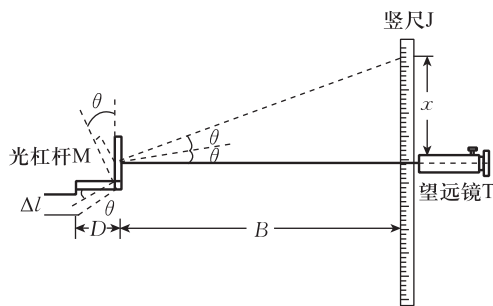


图 3-3-2 光杠杆放大原理

本实验中， B 约为 2 m， D 约为 10 cm，则放大倍数为 40 倍。适当地增加 B ，可增加光杠杆的放大倍数，光杠杆可以做得很轻，对微小伸长或微小转角的反应很灵敏，测量也很精确，在精密仪器中常有应用。例如，灵敏电流计通过光杠杆的放大可测量 $10^{-11} \sim 10^{-8}$ A 的电流。

将式 (3-3-3) 代入式 (3-3-2) 中，得到

$$E = \frac{8LB}{\pi d^2 D} \frac{\Delta f}{x} \quad (3-3-5)$$

式中, L 为金属丝长度 (图 3-3-3 中上夹头 Q 到下夹头 R 间的距离); B 为平面镜面至标尺的距离; D 为光杠杆前足连线与后足尖之间的距离; d 为金属丝的直径。 L 、 B 、 D 和 d 的数值, 可分别用米尺、游标卡尺、螺旋测微器测量。 Δf 由增减等质量的砝码实现, 即 $\Delta f = \Delta mg$, x 即为增加 (或减少) Δm 的砝码时所对应的望远镜中标尺读数变化值。通过加减砝码, 就会得到对应的 x 值, 将这些数据代入式 (3-3-5), 即可求出金属丝的杨氏模量。

通过本实验, 可了解光杠杆测量微小长度变化的原理, 掌握调整光杠杆和望远镜的基本要领以及用拉伸法测金属丝杨氏模量的方法, 进一步练习用逐差法处理实验数据。

四、实验装置

整个实验装置由拉伸仪和光杠杆系统组成, 如图 3-3-3 所示。拉伸仪的两根圆柱形支架直立在三角底座上, 金属架桥 H 将圆柱支架顶端连接固定, 金属丝 L 的上端固定在 H 中央的半圆形夹头 Q 点, 下端与挂钩连接, 挂钩上挂有砝码盘。金属丝穿过并固定于 R 夹, R 在平台 C 的孔中随金属丝伸缩 (砝码增减) 上下移动。光杠杆的前足尖放在平台 C 的同一凹槽内, 后足放在 R 夹上。在平面镜前约 2 m 的地方有一支架, 其上装有一竖尺 J , 尺旁安装着望远镜。望远镜水平地对准与其轴接近垂直的平面镜, 从望远镜中可以看到平面镜反射回来的竖尺像。望远镜中有细叉丝, 可用来对准竖尺像的某一刻度进行读数。

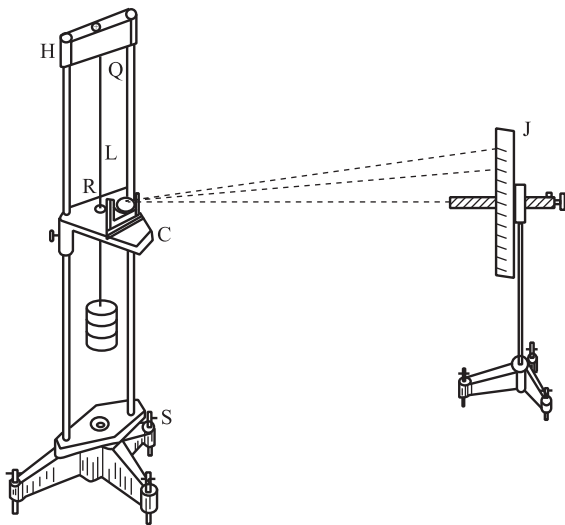


图 3-3-3 杨氏模量测定装置

进行测量前, 必须对整个装置做以下调整:

(1) 仪器垂直度调整。将铅锤挂在砝码钩上, 调整三个底脚螺丝 S , 使支架铅直, 平台 C 水平。

(2) 光杠杆调整。将光杠杆的两前足尖放在平台的凹形槽内, 后足立于钢丝夹 R 上, 并使三足尖在同一水平面上。粗调光杠杆平面镜法线, 使之大致与水平面平行。

(3) 镜尺位置调整。将望远镜标尺装置放在光杠杆、平面镜正前方约 1.5 m 处, 标尺铅直, 望远镜和平面镜位于同一高度, 并对准镜面。

(4) 光杠杆系统光路的调整。先用眼睛在望远镜筒外侧边缘沿镜筒方向观察平面镜中是否能看到标尺像。若无, 则上、下、左、右移动望远镜, 直到看到。

(5) 望远镜细调。旋转望远镜目镜, 使十字叉丝清晰。再松开固定目镜螺丝, 前后移动目镜, 以改变物镜与目镜间的距离, 使标尺反射像清晰且与叉丝之间无视差 (即眼睛略做上下移动时, 标尺像与叉丝无相对移动)。然后再稍做调整, 使落在叉丝横线上的标尺刻度数正好是与望远镜在同一高度的刻度, 如图 3-3-3 所示。

五、实验内容

(1) 调节仪器垂直, 将砝码架 (本底码) 挂在砝码钩上, 从望远镜中读得标尺刻度值, 计入数据表格。

(2) 在砝码架上依次增加 1 kg 的砝码, 直至 5 kg, 并记录每增加一次望远镜中对应的标尺刻度值。然后, 在砝码架上再加一砝码后, 依次减少 1 kg 砝码, 记录相应的标尺刻度值。

(3) 用螺旋测微器测量钢丝的直径 d , 要求在钢丝的不同部位多次测量, 以求其平均值。

(4) 用米尺量出钢丝长度 L 、平面镜与标尺之间的距离 B 。将光杠杆取下, 在一张白纸上压出 3 个足尖的痕迹, 然后用游标卡尺测出 D 值。以上各量均做一次测量, 用仪器误差估计测量值的不确定度。

(5) 注意事项。

① 在光杠杆和望远镜调好之后, 整个实验过程中要防止光杠杆的前足和望远镜及标尺的位置发生变化, 特别是在加减砝码时要格外小心, 轻取轻放, 并待稳定 1 min 后再读数。

② 注意保护金属丝的平直状态。如果发现金属丝略有弯曲, 可在砝码钩上先加一定量的本底砝码 (约 1 kg), 使它处在伸直的状态下开始做实验。

③ 测量中应随时注意判断数据, 以便及时发现问题, 改进操作。可根据待测量是否遵从测量公式的规律和多次测量是否重复来判断数据是否合理。

六、数据处理

本实验用逐差法处理数据, 按照本章后所附实验报告中的要求填写。

七、扩展阅读

托马斯·杨

托马斯·杨 (Thomas Young, 1773—1829) 是英国医生、物理学家, 光的波动说的奠基人之一。托马斯·杨不仅在物理学领域领袖群英、享誉世界, 而且涉猎甚广, 在数学、语言学、动物学、考古学等领域也有影响。

杨 19 岁时来到伦敦学习医学, 并在 21 岁时, 由于研究了眼睛的调节机理而成为英国皇家学会会员。杨 22 岁时到德国的格丁根大学学习医学, 并在一年后取得博士学位。

1800 年起托马斯·杨在伦敦行医并致力于科学研究, 在 1801 年担任皇家学院自然哲学教授, 后又任皇家学会秘书。

托马斯·杨曾被誉为生理光学的创始人。他在 1793 年提出人眼里的晶状体会自动调节以适应所见的物体的远近。他也是第一个研究散光的医生, 后来, 他出色觉取决于眼睛里的三种不同的神经, 分别感觉红色、绿色和紫色。他提出三原色原理, 认为一切色彩都可以由红、绿、蓝三种原色的不同比例混合而成。这一原理, 已成为现代颜色理论的基础。

托马斯·杨热爱物理学, 在行医之余, 他也花了许多时间研究物理。牛顿曾在其《光学》的论著中提出光是由微粒组成的, 在之后近百年的时间里, 人们对光学的认识几乎停滞不前, 直到托马斯·杨做了著名的杨氏双缝干涉实验, 奠定了光的波动说的基础。然而, 这

个理论在当时并没有受到应有的重视，却被权威们讥为“荒唐”和“不合逻辑”，在缺乏科学讨论的舆论气氛下被压制了近 20 年。杨并没有向权威低头，曾撰文勇敢地反击：“尽管我仰慕牛顿的大名，但是我并不因此而认为他是万无一失的。我遗憾地看到，他也会弄错，而他的权威有时甚至可能阻碍科学的进步。”杨在物理光学领域的研究是具有开拓意义的，他第一个测量了 7 种光的波长。20 世纪初，物理学家将杨的双缝实验结果和爱因斯坦的光量子假说结合起来，提出了光的波粒二象性，后来又被德布罗意利用量子力学引申到所有粒子上。

托马斯·杨对弹性力学也很有研究，是分析弹性体冲击效应的先驱，他指出杆受轴向冲击力以及梁受横向冲击力时可从能量进行分析而得出定量的结果。他在 1807 年将“材料的弹性模量”定义为“同一材料的一个柱体在其底部产生的压力与引起某一压缩度的重量之比等于该材料长度与长度缩短量之比”。杨认识到剪切是一种弹性变形，称之为横推量，并注意到材料对剪切的抗力不同于材料对拉伸或压缩的抗力，后人为了纪念他的贡献，把纵向弹性模量称为杨氏模量。

1814 年，41 岁的时候，杨对象形文字产生了兴趣。他解读了著名的罗塞达碑上的古埃及象形文字，破译了王室成员 13 位中的 9 个人名，并根据碑文中鸟和动物的朝向，发现了象形文字符号的读法，由此诞生了一门研究古埃及文明的新学科。

晚年的托马斯·杨已经成为举世闻名的学者，为《大英百科全书》撰写过 40 多位科学家传记以及无数条目，包罗万象。同时他还为一家重要的保险公司担任过统计检查官，并被任命为《航海天文历》的主持人，做了不少工作以改进实用天文学和航海援助。

大学物理实验报告

院系名称 _____

实验时间 _____

学 号 _____

姓 名 _____

实验 1 长度测量

一、实验目的

二、实验仪器

仪器名称	规格型号	数 量

三、实验原理

1. 简述游标卡尺的工作原理。
2. 简述螺旋测微器的工作原理。

四、实验内容及主要步骤（简述测量过程）

五、实验数据记录与处理

1. 数据记录。

表 1 检查游标卡尺与螺旋测微器

	精确度	空读数
游标卡尺		
螺旋测微器		



表 2 测量矩形板

	米尺				游标卡尺			
长								
宽								
厚								

表 3 测量钢球直径

	游标卡尺				螺旋测微器			
D_1								
D_2								

2. 由表 2 数据求出矩形板的长、宽、厚及体积。

3. 由表 3 数据求出钢球直径和体积。

六、实验结果与分析

七、思考题

1. 如何避免读错主尺上的大数？
2. 从测量矩形板的数据看，测量结果的主要误差原因是什么？

八、本次实验心得

分 数	
指导教师	



大学物理实验报告

院系名称_____

实验时间_____

学 号_____

姓 名_____

实验 2 谐振动研究

一、实验目的

二、实验仪器

仪器名称	规格型号	数 量

三、实验原理（简述利用简谐振动测振动周期的原理）

四、实验内容及主要步骤（简述测量过程）

五、实验数据记录与处理

1. 测定弹簧的劲度系数 K 。

表 1 测定弹簧的劲度系数 K

次数	砝码质量/g	L_1/cm	L_2/cm	ΔL	K	$\overline{K}$
1						
2						
3						

2. 弹簧振子周期 T 的测量与计算。

表 2 弹簧振子的周期 T

$m_s = (\quad) \text{g}$, $m_0 = (\quad) \text{g}$

砝码 质量/g	20 个完整振动所用时间			振动周期 T	按式 (3-2-2) 求出的周期 $T=2\pi\sqrt{\frac{m}{K}}$	按式 (3-2-3) 求出的周期 $T=2\pi\sqrt{\frac{m+m_0}{K}}$
	一次	二次	三次			



六、实验结果与分析

七、思考题

1. 本实验可能出现的错误有哪些？

2. 在公式 $T=2\pi\sqrt{\frac{m+m_0}{K}}$ 中， m_0 为弹簧的有效质量，试利用实验数据，由上式求出弹簧的有效质量。

八、本次实验心得

分 数	
指导教师	



大学物理实验报告

院系名称 _____

实验时间 _____

学 号 _____

姓 名 _____

实验 3 用拉伸法测金属丝的杨氏模量

一、实验目的

二、实验仪器

仪器名称	规格型号	数 量

三、实验原理（简述杨氏弹性模量的测量原理）

四、实验内容及主要步骤（简述测量过程）

五、实验数据记录与处理

1. 测量钢丝直径。

表 1 钢丝直径测量

测量次数	1	2	3	4	5	平均值	不确定度 ($\sigma_{\bar{d}}$)
直径 d/cm							



2. 测量钢丝长度 L 、平面镜与标尺间距离 B 及光杠杆足尖距离 D 。

表 2 钢丝长度 L 、平面镜与标尺间距离 B 及光杠杆足尖距离 D 的测量值

被测量	钢丝长度 L/cm	平面镜与标尺间距离 B/cm	光杠杆足尖距离 D/cm
测量值			
不确定度 (σ)	σ_L	σ_B	σ_D

3. 记录增减砝码时标尺读数。

表 3 增减砝码时标尺读数

砝码总质量 m_i/kg (不计本底砝码)	望远镜内标尺读数 n_i/cm			每隔 3 kg 标尺像刻度变化量 $\Delta x_i = n_{i+3} - n_i$
	增重时	减重时	平均值	
0				
1				
2				
3				—
4				—
5				—
平均值 ($\overline{\Delta x} = \frac{1}{3} \sum \Delta x_i$)	—	—	—	
不确定度 ($\sigma_{\overline{\Delta x}}$)	—	—	—	

由式 (3-3-4) 可得出增重 3 kg 砝码时所对应的计算公式为

$$E = \frac{8LB}{\pi d^2 D} \frac{\Delta mg}{\Delta x} = \frac{8LB}{\pi d^2 D} \frac{3g}{\Delta x} = \underline{\hspace{2cm}}$$

测量误差 $\sigma_E = \sqrt{\frac{\sigma_B^2}{B^2} + \frac{\sigma_{\Delta x}^2}{\Delta x^2} + \frac{\sigma_D^2}{D^2} + \frac{\sigma_L^2}{L^2} + 4 \frac{\sigma_d^2}{d^2}} \times E = \underline{\hspace{2cm}}$

测量结果

六、实验结果与分析

七、思考题

1. 用伸长法测钢丝杨氏模量时, 需直接测量哪几个量? 各个长度量分别用不同的量具测量, 是根据什么原则考虑的? 关键是测准哪几个量?



2. 实验中测量金属丝的伸长量时, 在同一质量下要分别测出增重和减重时的标尺刻度值, 然后取平均值作为该质量下的测量值, 这样做可以消除什么因素引起的误差?

3. 测量望远镜的调节步骤是什么? 先看清标尺像, 再调节目镜看清叉丝, 这样可以?

4. 光杠杆的放大率 $\beta=2B/D$, 能否可以通过增大 B 减小 D 来提高 β ? 这样做有没有好处? 有没有限度?

5. 本实验为什么用逐差法处理实验数据?



6. 本实验能否用作图法求杨氏模量? 如果以所加砝码值为横轴, 以标尺读数变化量为纵轴作图, 其图线应是什么形状? 图形是否通过零点? 如果不通过零点, 说明原因。

八、本次实验心得

分 数	
指导教师	

