



普通高等教育“十三五”重点规划教材

大学物理实验教程

EXPERIMENT OF COLLEGE PHYSICS

主 编 李艳萍 苏中乾

副主编 刘忠坤

第3版



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

普通高等教育“十三五”重点规划教材

大学物理实验教程

第3版

主 编 李艳萍 苏中乾
副主编 刘忠坤
参 编 苑忠英 刘志远 张咏明



机械工业出版社

本书根据教育部高等学校物理基础课程教学指导分委员会颁布的《理工科类大学物理实验课程教学基本要求》编写而成。

全书包括基础性实验、综合性实验、设计性研究性实验、综合创新型设计实验、演示实验，各类实验共计 84 个。

本书贯彻技能型学校着力培养学生动手能力、实践能力、创新能力的宗旨，在突出基本技能训练的同时，增大了综合性、设计性实验的比重，以切实提高学生的综合实践能力和创新能力。

本书可作为普通高等院校理工科各专业的大学物理实验教材，也可供教师备课或学生自主学习之用。

图书在版编目 (CIP) 数据

大学物理实验教程/李艳萍, 苏中乾主编. —3 版. —北京: 机械工业出版社, 2018. 1

普通高等教育“十三五”重点规划教材

ISBN 978-7-111-58908-2

I. ①大… II. ①李… ②苏… 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 (2018) 第 002972 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑: 张金奎 责任编辑: 张金奎 责任校对: 张 薇

封面设计: 张 静 责任印制: 常天培

唐山三艺印务有限公司印刷

2018 年 2 月第 3 版第 1 次印刷

184mm×260mm·19.5 印张·476 千字

标准书号: ISBN 978-7-111-58908-2

定价: 45.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

电话服务

服务咨询热线: 010-88379833

读者购书热线: 010-88379649

封面无防伪标均为盗版

网络服务

机工官网: www.cmpbook.com

机工官博: weibo.com/cmp1952

教育服务网: www.cmpedu.com

金书网: www.golden-book.com

前言

本书根据我们多年来的大学物理实验课程建设和教学改革经验，在《大学物理实验教程（第2版）》和《大学物理实验指导》的基础上，按照教育部高等学校物理基础课程教学指导分委员会颁布的《理工科类大学物理实验课程教学基本要求》编写而成，适合理工科各专业大学物理实验教学使用。

考虑到应用型本科转型的特点，教材的编写宗旨是以学生自主学习为基础，注重培养学生的创新能力，侧重基础知识在各专业学习过程中的应用。同时，本书凝练了课程建设和教学改革成果的内容，加强综合性、设计性实验的比重，加强学生实验创新能力的培养和训练，并利用演示实验激发学生的实验兴趣和拓展学生的实验个性。

在实验项目分类上，根据转型的必要性，注重模块化、分层次的理论和实验教学模式，根据应用型本科实验教学的实际情况，按照实验训练的性质和层次分为基础性实验，综合性实验、创新设计性实验及演示实验四个层次。力求贯彻以学生为本的理念，注重基础性、实践性、探索性、开放性的有机统一。强化培养学生物理思想、物理模型的实际应用能力，增强物理实验方法的基本训练，提高学生的综合实验能力，为培养学生创新意识和创新能力发挥很好的作用。

参与本书编写的有：李艳萍（绪论、第1章、实验4.5、实验4.6、实验4.7、实验4.8）、苏中乾（实验6.1、实验6.3）、苑忠英（第2章、第5章及附录）、张咏明（实验3.5、实验3.6、实验3.7、实验3.11、实验3.12、实验3.13、实验3.14、实验3.15、实验3.16、实验4.1）、刘志远（实验3.1、实验3.2、实验3.3、实验3.4、实验3.8、实验3.9、实验3.10、实验4.2、实验4.3、实验4.4、实验4.9）、刘忠坤（实验6.2、实验6.4、第7章）。在编写过程中参考了许多兄弟院校的相关教材，在此表示衷心的感谢！由于编者的经验和水平有限，不妥之处在所难免，恳请读者和同行专家批评指正。

编者

目 录

前言

绪论	1
----------	---

第 1 章 测量误差与数据处理	5
-----------------------	---

1.1 测量	5
--------------	---

1.1.1 测量的定义	5
-------------------	---

1.1.2 直接测量和间接测量	5
-----------------------	---

1.1.3 基本单位和导出单位	6
-----------------------	---

1.1.4 误差与误差分析	6
---------------------	---

1.1.5 测量不确定度	9
--------------------	---

1.2 有效数字	13
----------------	----

1.2.1 有效数字和仪器读数规则	13
-------------------------	----

1.2.2 有效数字的运算及修约规则	15
--------------------------	----

1.3 数据处理的常用方法	17
---------------------	----

1.3.1 列表法	17
-----------------	----

1.3.2 作图法	17
-----------------	----

1.3.3 逐差法	19
-----------------	----

1.3.4 最小二乘法和一元线性回归	20
--------------------------	----

1.4 物理实验的基本方法	21
---------------------	----

1.4.1 比较法	21
-----------------	----

1.4.2 放大法	21
-----------------	----

1.4.3 补偿法	22
-----------------	----

1.4.4 转换法	22
-----------------	----

1.4.5 模拟法	23
-----------------	----

第 2 章 基本实验仪器的使用和操作	
--------------------	--

方法	25
----------	----

2.1 力学、热学实验常用仪器	25
-----------------------	----

2.2 电磁学实验常用仪器	32
---------------------	----

2.3 光学实验常用仪器	36
--------------------	----

2.4 基本操作方法	39
------------------	----

第 3 章 基础性实验	42
-------------------	----

3.1 长度的测量	42
-----------------	----

3.2 密度的测量	47
-----------------	----

3.3 转动惯量的测量	49
-------------------	----

3.4 弯梁法测量金属材料的弹性模量	55
--------------------------	----

3.5 测金属丝的线膨胀系数	59
----------------------	----

3.6 金属电阻温度系数的测定	61
-----------------------	----

3.7 分光计的调整与使用	62
---------------------	----

<拓展>	68
------------	----

3.8 用分光计测折射率	70
--------------------	----

3.9 牛顿环	72
---------------	----

<拓展>	75
------------	----

3.10 电表的改装与校准	76
---------------------	----

<拓展>	80
------------	----

3.11 电阻的伏安特性研究	81
----------------------	----

3.12 多用表的使用	85
-------------------	----

3.13 箱式电桥测电阻	90
--------------------	----

3.14 静电场的描绘	95
-------------------	----

<拓展>	99
------------	----

3.15 铁磁材料的磁滞回线和基本磁化	
---------------------	--

曲线	100
----------	-----

3.16 示波器的调整与使用	104
----------------------	-----

第 4 章 综合性实验	118
-------------------	-----

4.1 声速测定	118
----------------	-----

4.2 压力传感器特性研究及其应用	126
-------------------------	-----

4.3 液体表面张力系数的测量	129
-----------------------	-----

4.4 用分光计测光栅常数和波长	131
------------------------	-----

4.5 光电效应法测定普朗克常量	135
------------------------	-----

4.6 密立根油滴实验测量电子电荷	140
-------------------------	-----

4.7 霍尔效应测磁场	146
-------------------	-----

4.8 电阻特性的研究	148
-------------------	-----

4.8.1 热敏电阻温度特性的研究	148
-------------------------	-----

4.8.2 光敏电阻的光电特性研究	150
-------------------------	-----

4.9 数字万用表实验	151
-------------------	-----

第 5 章 设计性研究性实验	159
----------------------	-----

5.1 设计性研究性实验的性质和任务	159
--------------------------	-----

5.1.1 设计性研究性实验概述	159
------------------------	-----

5.1.2 设计性研究性实验的实施程序	159
---------------------------	-----

5.2 实验方案的选择	160	6.3.4 稳压电路	238
5.2.1 实验方法的选择	160	6.3.5 RC 一阶电路响应与研究	240
5.2.2 测量方法的选择	160	6.3.6 二阶电路的响应研究	245
5.2.3 测量仪器的选择与配套	161	6.3.7 电路混沌效应	248
5.2.4 测量条件的选择	162	6.3.8 霍尔效应、亥姆霍兹线圈磁场 实验、螺线管磁场测量实验	249
5.2.5 数据处理方法的选择	163	6.4 光学综合实验	260
5.2.6 设计性研究性实验的要求	164	6.4.1 透镜焦距的测定	260
5.3 重力加速度的测定	164	6.4.2 单缝衍射实验	263
5.4 不规则固体密度的测定	166	6.4.3 细丝直径的测量(选做)	266
5.5 电表内阻的测定	167	6.4.4 偏振光实验	267
5.6 望远镜与显微镜的组装	169	6.4.5 三棱镜实验	273
5.7 简谐振动的研究	171	6.4.6 双棱镜干涉	275
5.8 滑动变阻器的使用与电器控制	173	第7章 演示实验	280
5.9 万用电表的设计	177	7.1 跳环式楞次定律演示	280
5.10 测定物体折射率	183	7.2 电磁炮	280
5.11 纺织品介电常数的测定	185	7.3 温差发电演示	281
5.12 电阻温度计的设计	187	7.4 质心运动演示	282
第6章 综合创新型设计实验	189	7.5 茹可夫斯基凳演示	283
6.1 力学综合实验仪的应用实验	189	7.6 转盘式科里奥利力演示	285
6.1.1 用三线摆法测定物体的转动 惯量	189	7.7 海市蜃楼演示	286
6.1.2 用扭摆法测定金属材料的切变 模量	194	7.8 逆风行舟	287
6.1.3 研究单摆的运动特性	197	7.9 辉光球	288
6.1.4 复摆特性的研究	201	7.10 白光反射全息图	289
6.1.5 双线摆碰撞打靶研究平抛运动 ..	204	7.11 水波演示	290
6.1.6 用自由落体法测量重力加速度 ..	206	7.12 角动量合成演示	292
6.1.7 惯性秤的定标与物体惯性质量的 测定	209	7.13 亥姆霍兹线圈磁场演示	293
6.2 热学综合实验	214	7.14 圆形电流磁场模型	294
6.2.1 热电阻特性实验	217	7.15 超声成像演示	295
6.2.2 PN 结正向压降与温度关系的 研究和应用	220	7.16 等厚干涉磁致伸缩演示	296
6.2.3 集成温度传感器	224	7.17 滴水自激感应起电	297
6.2.4 固体线胀系数的测量	227	7.18 巴克豪森效应演示	298
6.3 电磁学综合实验	231	7.19 神奇的普氏摆	299
6.3.1 基本电路的测量	232	7.20 温柔的电击	300
6.3.2 基本仪器的使用	233	附录	302
6.3.3 整流滤波电路	236	附录 A 国际单位制的基本单位	302
		附录 B 常用物理参数	302
		参考文献	305

绪 论

实验是人们认识研究自然规律、改造自然世界的一种特殊的实践形式和方法。人们通过实验认识自然规律,检验自然规律,并且一些生活和生产实际中的问题也可以通过实验来解决。大学物理实验是高等院校理工科专业的必修课,也是一门实践性和应用性很强的课程。大学物理实验教学不仅能帮助学生正确理解物理概念和规律,而且与课堂理论教学相比,在培养和提高学生动手能力、观察能力、理论联系实际能力等方面都更具优势。同时也为学生的研究能力、开拓能力、创新意识等综合科学素质的培养提供了较好途径。因此,实验课程在大学物理教学中具有不可替代的作用,是培养学生学习能力、实践能力、创新能力的重要环节。同时,大学物理实验课程也是培养实践能力强的创新人才的重要基础。

1. 物理实验课的任务

根据教育部高等学校物理学与天文学教学指导委员会物理基础课程教学指导分委员会制定的《理工类大学物理实验课程教学基本要求》,物理实验课程的具体任务是:

(1) 学生通过对实验现象的观察分析和对物理量的测量,加深对物理学原理的理解,提高解决实际问题的能力,为后续课程的学习打下坚实的基础,从而提高学生的综合素质。

(2) 学生在物理实验课中主要是通过自己独立的实验实践来学习物理实验知识,其中包括:

- 1) 能够自行阅读实验教材,做好实验前的预习;
- 2) 能够掌握各种实验测量仪器的正确使用方法;
- 3) 能够运用物理学理论对实验现象进行初步分析判断并掌握基本实验方法;
- 4) 能够正确记录实验数据并用科学处理方法,归纳总结实验结果,撰写合格的实验报告;
- 5) 能够独立完成基础性实验、综合性实验、简单的设计性和创新性实验。

2. 物理实验的基本程序和实验报告

物理实验课的基本环节包括:实验前的预习、实验操作、实验报告。

(1) 实验前的预习 (10 分)

实验预习是物理实验的首要步骤,学生在进行每个实验之前,必须做好认真充分的预习。实验预习的目的是全面认识和了解实验目的,理解实验原理,了解实验仪器的使用方法,明确实验的具体内容。预习包括阅读材料、熟悉仪器和写出预习报告。

仔细阅读实验教材和有关的资料,重点解决的问题是:

- 1) 做什么:这个实验最终要得到什么结果;
- 2) 根据什么去做:实验课题的理论依据和实验方法的道理;
- 3) 怎么做:实验的方案、条件、步骤及实验关键。

(2) 实验预习报告要求书写整洁、清晰,排版合理。预习报告格式要求:

- 1) 实验名称;
- 2) 实验目的;
- 3) 实验仪器;
- 4) 实验原理简述(原理、有关定律或公式,电路图或光路图);
- 5) 实验数据记录表格;
- 6) 预习思考题。

(3) 实验的操作(40分)

实验操作是物理实验最重要的过程,学生进入实验室后,先在实验室准备好的实验室记录上签到,然后认真听好实验教师的讲解指导,再按照编组使用相应的指定仪器。根据事先设想好的步骤演练一下,然后再按确定的步骤开始实验。要注意细心观察实验现象,认真钻研和探索实验中的问题,冷静地分析和处理问题。仪器发生故障时,要在教师的指导下学习排除故障的方法。总之,要把重点放在实验能力的培养上,而不是测出几个数据就认为完成了任务。

要做好测量和原始记录,要先观察实验所要记录的实验现象,确认无异常后,开始记录数据,记录原始数据要注意有效数字,并与数据表格中的单位相对应,原始数据不得擅自改动,如果记错,可在数据上画一横线,然后在其下面更改数据。实验结束,先将实验数据交教师审阅,经教师验收签字后,然后再整理还原仪器,方可离开实验室。

(4) 实验报告(50分)

实验后要对实验数据进行科学正确地处理。数据处理过程包括计算、作图、误差分析等。计算要有计算式,代入的数据都要有根据,作图要按作图规则,图线要规矩、美观。数据处理后应给出实验结果。最后要求撰写出一份完整的实验报告。

实验报告内容包括:

- 1) 实验名称;
- 2) 实验目的;
- 3) 实验仪器;
- 4) 实验原理:简要叙述有关物理内容及测量中依据的主要公式、式中各量的物理含义及单位、公式成立所应满足的实验条件等;
- 5) 实验步骤:根据实际的实验过程写明关键步骤;
- 6) 注意事项;
- 7) 数据处理包括列表报告数据,完成计算、曲线图、不确定度计算或误差分析,最后写明实验结果;
- 8) 小结和讨论内容不限,可以是对实验中现象的分析、对实验关键问题的研究体会、实验的收获和建议,也可以是解答实验思考题。

3. 物理实验室规则

学生进入实验室,在实验过程中坚持安全第一,严格遵守操作规程和注意事项,严格避免发生人身或设备事故。

- (1) 正确使用电源,未经实验教师同意,不得随意打开电源。
- (2) 接、拆线路必须在断电状态下进行。
- (3) 不得随意搬动与实验无关的仪器,不得随意调换仪器,要爱护仪器。

(4) 注意防火、防水、防电。

(5) 注意实验室的卫生。

4. 怎样学好物理实验

物理实验是一门实践性课程,学生是在自己独立工作的过程中增长知识、提高能力。

(1) 要注意掌握基本的实验方法和测量技术

基本的实验方法和测量技术在实际工作中会经常遇到,并且是复杂的方法和技术的基礎。学习时不但要搞清它们的基本道理,还应该逐步地熟悉和记牢它们,且能运用这些方法和技术设计一些简单的实验。任何一种实验方法和测量技术都有着它应用的条件、优缺点和局限性,只有亲自做了一定数量的实验后,才会对这些条件、优缺点和局限性有切身的体会。虽然方法和手段会随着科学技术和工业生产的进步而不断改进,但历史积累的方法仍是人类知识宝库精华的一部分,有了积累才能有创新,因此,从一开始就应十分重视实验方法知识的积累。

(2) 要有意识地培养良好的实验习惯

学生进入实验室要遵守实验室操作规程和安全规则。在开始做实验之前,应当先认真阅读实验教材和有关仪器资料,这样才有可能对将要做的实验工作有具体而清楚的了解;在实验过程中要求认真并重视观察实验现象,一丝不苟地记录实验数据。要求记录数据要原始、完整、全面、清楚,要有必要的说明注释等。这样才有可能在需要时随时查阅这些记录,而在处理数据、分析结果时,有足够的的第一手资料。在实验过程中,注意记录实验的环境条件(如室温、气压、湿度、仪表名称、规格、量程和精度等),注意实验仪器在安置和使用上的要求和特点,还要注意纠正自己不正确的操作习惯和姿势。需要两人合作时,要密切配合。良好的习惯需要经过很多次实验后的总结、反思和回顾以后才能形成。而良好的实验习惯对保证实验的正常进行,确保实验中的安全,防止差错的发生,都有很好的作用。无数实践证明,良好习惯的养成,只有在实验的过程中有意识地去锻炼自己才行。

(3) 要注意养成善于分析的习惯

实验中要善于捕捉和分析实验现象,力争独立排除实验中各种可能出现的故障,并锻炼自己自主发现问题、分析问题和解决问题的能力。例如,实验数据是否合理、正确?实验结果的可靠性和正确性又如何?这些问题的解决,主要依靠分析实验方法是否正确、合理?它可能引入多大的误差?实验仪器又会带来多大误差?实验环境、条件的影响又将如何?为了帮助初学者克服实验经验少、还没有掌握一整套分析实验的方法等实际情况,物理实验课往往在实验教材中安排少数已有十分确切理论结论的实验项目,使初学者便于判断实验结果的正确性。但千万不要误认为做实验的目的只是为了得到一个标准的实验结果。如果获得的实验数据与标准数据符合了就高兴,一旦有所差别,就大失所望,抱怨仪器或装置不好,甚至拼凑数据,这些表现都是不正确的,是违背科学的。事实上,任何理论公式和结论都是经过一定的理论上的抽象并被简化了的,而客观事实与实验所处的环境条件则要复杂得多,实验结果与理论公式、结论之间发生差别是必然会有,问题是差异有多大?是否合理?不论实验结果或数据是好是坏,都应养成分析的习惯。当然也不要贸然下结论。首先要检查自己的操作和读数,注意实验装置和环境条件。若操作和读数经检查正确无误,那么毛病可能出现在仪器和装置本身。小的故障、小的毛病,实验者应力求自己动手去排除。能否发现仪器装置的故障、能否及时迅速修复,正是一个人的实验能力强弱的重要表现,初学者应要求自己逐

步提高这方面的能力。

(4) 要掌握好每个实验的重点

每个实验的内容都是有弹性的，首先应完成基本内容，这既是基础，也是重点。所以必须注意实验的目的，这样可以提高学习效率。完成基本内容后，如果时间许可，可以根据具体情况，进一步完成其他内容。尝试去分析实验可能存在的一些问题，如使用仪器的精度、可靠性，实验条件是否已被满足？怎样给予证实？或进一步提出改进实验的建议，试做一些新的实验内容等。

(5) 要注意创新能力的培养

教学实验虽然是经过安排设计的，但仍然要多思考一些问题。如每一项实验内容为什么要通过这样的途径（方法）进行测量，有什么改进建议等。激发求知欲望和学习热情，从而提高创新意识、增强创新能力。

1.1 测量

1.1.1 测量的定义

物理实验不仅要定性观察各种物理现象，更重要的是找出有关物理量之间的定量关系，而且还需要定量地测量有关物理量。测量的意义就是将待测的物理量与选作计量标准单位的同类物理量进行比较的过程。选作计量单位的标准必须是国际公认的、唯一的、稳定不变的。例如，真空中的光速是一个不变的量，国际单位制由此规定以光在真空中 $1/299792458\text{s}$ 的时间间隔内所经路径的长度作为长度单位—— 1m 。

测量一个物体的长度，就是找出该被测量是 1m 的多少倍，这个倍数称为测量的读数。数值连同单位记录下来便是数据，称为量值。量值用数值和单位的乘积来表示。

1.1.2 直接测量和间接测量

测量可分为直接测量和间接测量两类。

1. 直接测量

直接测量是测量的基础，是把被测量直接与标准量（量具或仪表）进行比较，直接读数，直接得到数据，这样的测量就是直接测量，相应的物理量称为直接测量量。例如，用米尺测量长度，用天平测量质量。

2. 间接测量

大多数物理量没有直接测量的量具或仪表，不能直接得到测量数据，但能够找到它与某些直接测量量的函数关系。测出直接测量量，通过函数关系得到被测量的测量数据，这种测量称为间接测量。

例如，直接测量圆柱的高度 h 和圆的直径 d ，然后通过公式求它的体积。值得注意的是，有的物理量既可以直接测量，也可以间接测量，这主要取决于使用的仪器和测量方法。随着测量技术的发展，用于直接测量的仪器越来越多。但在物理实验中，有许多物理量仍需要间接测量。

评价测量结果常用精密度、准确度和精确度三个概念，它们之间既有联系，也有区别。

精密度是衡量多次测量数值之间互相接近程度的量，由偶然误差大小决定，与系统误差无关。测量精密度高是指多次重复测量结果比较集中一致，测量的偶然误差小，系统误差可能较大。

准确度是衡量所测数值与真值接近程度的量。测量的准确度高是指多次测量的平均值偏离真值较小，系统误差也一定小，偶然误差可能不小。

精确度是反映所测数值的精密度与准确度的综合情况的量。测量的精确度高是指测量数值既比较集中一致，又在真值附近，即测量的系统误差和偶然误差都比较小。

1.1.3 基本单位和导出单位

不同的物理量有各自不同的单位，幸而各物理量不是相互独立的，而是由许多物理定义和物理规律联系起来的，所以只需要规定少数几个物理量的单位，其他物理量的单位就可根据定义和物理规律推导出来。独立定义的单位叫做基本单位，相对应的物理量叫做基本量；由基本单位推导出的单位叫做导出单位，相对应的物理量叫做导出量。

在物理学发展过程中，曾建立过各种不同的单位制，各单位制选取的基本量和规定的单位各不相同，使用中常常造成混乱，带来诸多不便。1960年，国际计量大会正式通过了一种通用于一切计量领域的单位制——国际单位制，用符号“SI”表示。SI规定的基本单位有7个。

1.1.4 误差与误差分析

1. 测量的误差

实践证明，测量结果都具有误差，误差自始至终存在于一切科学实验和测量的过程中。因为任何测量仪器、测量方法、测量环境、测量者的观察力等都不可能做到绝对严密，这些就使测量不可避免地伴随有误差产生。因此分析测量中可能产生的各种误差，尽可能消除其影响，并对测量结果中未能消除的误差做出估计，就是物理实验和许多科学实验中必不可少的工作。测量误差就是测量结果与待测量的客观真值之差，我们称之为绝对误差。评价一个测量结果的准确程度不仅看误差的绝对大小，还要看被测量本身的大小，于是可定义出相对误差的概念，即相对误差 $E = \text{绝对误差} / \text{待测量的客观真值}$ （用百分数表示）。任何一个物理量，在一定的条件下，都具有确定的量值，这是客观存在的，这个客观存在的量值称为该物理量的真值。测量的目的就是要力图得到被测量的真值。设被测量的真值为 x_0 ，测量值为 x ，则绝对误差 Δx 为

$$\Delta x = x - x_0 \quad (1-1)$$

由于误差不可避免，没有误差的测量结果是不存在的。测量误差存在于一切测量之中，贯穿于测量过程的始终。随着科学技术水平的不断提高，测量误差可以被控制得越来越小，但是却永远不会降低到零。

2. 最佳值与偏差

在实际测量中，为了减小误差，常常对物理量 x 做 n 次等精度测量，得到包含 n 个测量值 $x_1, x_2, \dots, x_n$ 的一个测量列。由于是等精度测量，我们无法断定哪个值更可靠，概率论可以证明，其算术平均值为

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

算术平均值并非真值，但它比任一次测量值的可靠性都要高，称为最佳值，是最可以信赖的，也称期望值。系统误差忽略不计时的算术平均值可作为最佳值，称为近真值。我们把测量值与算术平均值之差称为偏差，即

$$\Delta x_i = x_i - \bar{x} \quad (1-3)$$

3. 误差的分类及其处理方法

从研究误差的需要出发,根据误差产生的原因和性质的不同,可将误差分为系统误差、随机误差、过失误差。

(1) 系统误差

在同样条件下,对同一物理量进行多次测量,其误差的大小和符号保持不变或随着测量条件的变化而有规律地变化,这类误差称为系统误差。它的来源主要有以下几个方面:

1) 方法误差 这是由于实验方法或理论不完善而导致的。例如,采用伏安法测电阻时(采用不同的连接方法),电表的内阻产生的误差;采用单摆的周期公式 $T=2\pi\sqrt{l/g}$ 测量周期时,摆角不能趋于零而引起的误差,这些都是方法误差。

2) 仪器误差 这是由于仪器本身的固有缺陷或没有按规定条件调整到位而引起误差。例如温度计的刻度不准,天平的两臂不等长,砝码标称质量不准确等。

3) 环境误差 这是由于周围环境(如温度、压力、湿度、电磁场等)与实验要求不一致而引起的误差。例如在 20°C 条件下校准的仪器拿到 -20°C 环境中使用。

4) 人身误差 这是由于观测人员生理或心理特点所造成的误差。例如记录某一信号时有滞后或超前的倾向,对准标志线读数时总是偏左或偏右、偏上或偏下等。

系统误差的特征是具有确定性。对于实验者来说,系统误差的规律及其产生原因,可能知道,也可能不知道。已被确切掌握其大小和符号的系统误差称为可定系统误差;对于大小和符号不能确切掌握的系统误差称为未定系统误差。前者一般可以在测量过程中采取措施予以消除,或在测量结果中进行修正。而后者一般难以做出修正,只能估计其取值范围。例如,仪器的示值误差(允差)就属于未定系统误差。

系统误差处理

系统误差一般难以发现,并且不能通过多次测量来消除。人们通过长期实践和理论研究,总结出一些发现系统误差的方法,常用的有:

1) 理论分析法 包括分析实验所依据的理论和实验方法是否有不完善的地方;检查理论公式所要求的条件是否得到了满足;量具和仪器是否存在缺陷;实验环境能否使仪器正常工作以及实验人员的心理和技术素质是否存在造成系统误差的因素等。例如实际中电压表内阻不等于无穷大,电流表内阻不等于零,这都会产生系统误差。

2) 实验比对法 对同一待测量可以采用不同的实验方法,使用不同的实验仪器,以及由不同的测量人员进行测量。对比、研究测值变化的情况,可以发现系统误差的存在。

3) 数据分析法 因为偶然误差是遵从统计分布规律的,所以若测量结果不服从统计规律,则说明存在系统误差。我们可以按照测量列的先后次序,把偏差列表或作图,观察其数值变化的规律。比如前后偏差的大小是递增或递减的;偏差的数值和符号有规律地变化,在某些测量条件下,偏差均为正号(或负号),条件变化以后偏差又都变化为负号(或正号)等情况,都可以判断存在系统误差。

减小与消除系统误差的方法

实际测量中,为提高测量的准确度,常采用一些有效的测量方法,来消除或减小可定系统误差。

1) 交换法 根据误差产生的原因,在一次测量之后,把某些测量条件交换一下再次测量。例如,用天平两次称衡一物体质量时,第二次称衡将被测物与砝码交换。两次称量结果

分别为 m_1 、 m_2 ，则取 $m = \sqrt{m_1 m_2}$ 为最终称量结果，可以克服天平不等臂误差。

2) 替代法 在测量条件不变的情况下，先测得未知量，然后再用一已知标准量取代被测量，而不引起指示值的改变，于是被测量就等于这个标准量。例如，在电表改装实验中测量表头内阻时，通过单刀双掷开关分别对表头和电阻箱进行同等测量，调节电阻箱阻值，保持电路总电流相同，此时电阻箱的阻值就是被测表头内阻，这样就避免了测量仪器内阻引入的误差，如图 1-1 所示。

3) 抵消法 改变测量中的某些条件（如测量方向），使前后两次测量结果的误差符号相反，取其平均值以消除系统误差。例如，千分尺有空行程，即螺旋旋转时，刻度变化，量杆不动，在检定部位产生系统误差。为此，可从正反两个旋转方向对线，顺时针对准标志线读数为 d ，不含系统误差时值为 a ，空行程引起系统误差 ε ，则有 $d = a + \varepsilon$ ；第二次逆时针旋转对准标志线读数 d' ，则有 $d' = a - \varepsilon$ ，于是正确值 $a = (d + d')/2$ ，正确值 a 中不再含有系统误差。

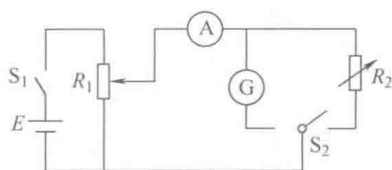


图 1-1 替代法测电表内阻电路示意图

4) 半周期法 采用半周期法减小周期性系统误差。对周期性系统误差，可以相隔半个周期进行一次测量，取两次读数的算术平均值，可有效地减小周期性系统误差。

5) 补偿法 在测量过程中，由于某个条件的变化或仪器某个环节的非线性特性都可能引入变值系统误差。此时，可在测量系统中采取补偿措施，自动消除系统误差。例如在量热学实验中，采用加冰降温，使系统的初温低于环境温度而吸热，以补偿在升温时的热损失。

6) 修正法 对于有些零值误差，如千分尺使用时间较长后产生的磨损，可引入一个修正值，在测量时进行修正。对于仪器的示值误差，可通过与高精度仪器比较，或根据理论分析导出修正值，予以修正。

对于无法忽略又无法消除或修正的未定系统误差，可用估计误差极限值（仪器最大允许误差）的方法进行估算。

(2) 随机误差

随机误差的特征是在同一条件下多次测量同一量时，每次出现的误差时大时小，时正时负，没有确定的规律，但就总体来说服从一定的统计规律。这种误差来源于多种因素的微小扰动。例如，环境的温度、气压、电场、磁场的微小扰动；读数时，每次对准标志（刻线、指针等）的不一致，以及估读数的不一致；被测对象本身的微小起伏变化等。

随机误差的统计规律

假设系统误差已经消除，而被测量本身又是稳定的，以同样条件下，多次重复测量，其结果彼此互有差异，这就是随机误差引起的。在取得大量数据后，便能发现随机误差的统计规律。这种统计规律表现在以下四点：

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。

正是因为具有抵偿性，所以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。

有限次测量的平均值和标准偏差

在测量条件不变的情况下，如果对待测量进行了 n 次测量，得到 n 个测量 $x_1, x_2, \dots, x_n$ ，这 n 个测量值都带有随机误差，首先要解决的问题是：从这 n 个测量值的信息中，取怎样的值作为客观真值 x 的最佳估计值呢？

解决这个问题是根据准则：一个等精度测量列的最佳估计值是能使各次测量值与该值之差的平方和为最小的那个值。设这个值为 x_0 ，则上述准则写成数学表达式为

$$f(x_0) = \sum_{i=1}^n (x_i - x_0)^2 = \text{最小值}$$

即有

$$\frac{df(x_0)}{dx_0} = 0$$

从而得到

$$x_0 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = \bar{x} \quad (1-4)$$

也就是说，这一组数据的算术平均值就是客观真值的最佳估计值。所以用算术平均值来表示测量结果。

其次，要解决的问题是：从这 n 个测量值的信息中，怎样估算随机误差的大小呢？为此引入残差的概念：每一次测量值 x_i 与平均值 $\bar{x}$ 之差称之为残差，即

$$\Delta x_i = x_i - \bar{x}, \quad i = 1, 2, \dots, n$$

显然，这些残差有正有负，有大有小。常用“方均根”法对它们进行统计，得到的结果就是单次测量的标准偏差，以 s_x 表示为

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

我们可以用这一标准偏差表示测量的随机误差，它可以表示这一测量值的精密度，标准偏差小就表示测量值很密集，即测量的精密度高；标准偏差大就表示测量值很分散，即测量的精密度低。

(3) 过失误差

过失误差是由于实验者使用仪器的方法不正确，实验方法不合理，粗心大意，过度疲劳，记错数据等引起的。这种误差是人为的，只要实验者采取严肃认真的态度，具有一丝不苟的作风，过失误差是可以避免的。

1.1.5 测量不确定度

1. 不确定度

测量不确定度是与测量结果相联系的参数，表征合理地赋予被测量之值的分散性。从词义上理解，测量不确定度是测量结果有效性的可疑程度或不肯定程度；从统计概率的概念上理解，它是被测量的真值所处范围的估计值。真值是一个理想化的概念，是实际上难以操作的未知量，人们把通过实际测量所得到的量值赋予被测量，这就是测量结果。这个结果不必然落在真值上，即测量结果具有分散性。因此，还要考虑测量中各种因素的影响，估算出一

个参数, 并把这个参数赋予分散性。也就是说, 用一个恰当的参数来表述测量结果的分散性, 这个参数就是不确定度。

(1) 这个参数, 可以是标准偏差 s , 可以是 s 的倍数 ks , 也可以是具有某置信概率 p (如 $p=95\%$ 、 99%) 的置信区间的半宽。

(2) 测量不确定度一般由若干分量组成, 这些分量恒只用实验标准偏差给出而称为标准不确定度。其中如果由测量列的测量结果按统计方法估计, 则称之为 A 类标准不确定度; 其中如由其他方法和其他信息的概率分布估计的, 称之为 B 类标准不确定度。这些标准不确定度现均用符号 Δ 表示, 如 $\Delta(x)$ 或 Δ_x 。

(3) 实验的测量结果是被测量之值的最佳估计以及全部不确定度成分。在不确定度的分量中, 也应包括那些由系统效应, 如与修正值、参考计量标准器有关的不确定度分量, 这些分量都对实验结果的分散性有“贡献”。

(4) 不确定度的常用术语与定义。

标准不确定度: 用标准差表示的测量不确定度。

A 类标准不确定度评定或标准不确定度的 A 类评定: 用对观测列进行统计分析的方法, 来评定标准不确定度。

B 类标准不确定度评定或标准不确定度的 B 类评定: 用不同于对观测列进行统计分析的方法来评定的标准不确定度。

合成标准不确定度: 当测量结果是由若干其他量的值求得时, 按其他各量的方差和协方差算得的标准不确定度。它是测量结果标准差的估计值。

扩展不确定度: 确定测量结果区间的量, 合理赋予被测量之值分布的大部分可望含于此区间。

包含因子: 为求得扩展不确定度, 对合成标准不确定度所乘的数字因子。包含因子也称为覆盖因子。

自由度: 在方差的计算中, 和的项数减去对和的限制数。

置信概率 (置信水平): 与置信区间或统计包含区间有关的概率值, 常用百分数表示。

2. 与不确定度有关的概念

(1) 被测量与误差

量值: 量值是由一个数乘以测量单位所表示的特定量的大小。

真值、约定真值: 量的真值 μ 定义为与给定的特定量定义相一致的量值。真值是一个理想化的概念, 只有通过符合定义的、完美无缺的测量才有可能得到。对于给定目的具有适当不确定度的、赋予特定量的值称为约定真值。该值有时是约定采取的。常用到的约定真值有: 由国际计量会议约定的值或公认的值, 如基本物理常数、基本单位标准; 高一级仪器校验过的计量标准器的量值 (称为实际值); 修正过的算术平均值 (称为最佳值) 等。

被测量、测得值、测量结果: 作为测量对象的特定量称为被测量。由测量所得到的并赋予被测量的量值, 称为测得值或测量结果。在给出测得值时, 应说明它是示值、未修正的测得值或已修正的测得值。在测量结果的完整表示中, 还应包括测量不确定度的完整表示。

测量误差 (真误差)、绝对误差、相对误差: 测量误差 (真误差) 定义为测量结果减去被测量的真值, 该差值带有正、负号, 具有测量单位, 称为绝对误差。绝对误差除以真值, 单位为 1, 称为相对误差。相对误差也常用百分数表示。

示值误差、引用误差、准确度等级：描述仪器特性的术语。仪表的示值误差是仪表的示值与真值之差。引用误差是仪表的示值误差与引用值（如全量程）之比。有时用引用误差绝对值不超过某个界限的百分数来确定仪表的准确度等级。准确度是一个定性的概念，例如，可以说准确度高、低、准确度为 0.25 级、准确度为 3 等及符合 $\times\times$ 标准；但不得使用如下表示：准确度为 25%、16mg、 $\leq 16\text{mg}$ 、 $\pm 16\text{mg}$ 。不要用术语“精密度”或“精度”代替“准确度”。

(2) 常用统计学术语和概念

总体、数学期望：在相同条件下，对某一稳定的量进行无限次测量，获得的全部测得值称为总体。总体的平均值，称为期望（数学期望值）。

系统误差与随机误差：期望与真值的差称为系统误差，测得值与期望之差称为随机误差。若已知系统误差或其近似值，可反复修正测得值；随机误差则不能修正。

总体方差、总体标准偏差：无限次测量的随机误差的平方取平均称为总体方差。总体方差的正平方根称为总体标准偏差。该值无正负号，它描述了测得值或随机误差的分散的特征。

样本、期望的估计：在相同条件下，对同一稳定的量进行 n 次测量，得到的 n 个测得值称为总体的样本，样本平均值是期望的估计（值）。

残差、样本方差、样本标准偏差：每个测得值与样本平均值之差称为残差。残差平方的平均值（分母常用 $n-1$ ）即样本方差，样本方差是总体方差的估计（值）。取样本方差的正平方根得到样本标准偏差。样本标准偏差描述了每个（ n 次测量的任何一次）测得值对于样本平均值的分散的特征。

样本平均值的标准偏差：表征估计对于期望的分散特征。样本平均值的标准偏差是样本标准偏差的 $1/\sqrt{n}$ 。

3. 直接测量结果的表示和总不确定度的估计

表示完整的测量结果，应给出被测量的量值 x_0 ，同时标出测量的总不确定度 Δ ，写成 $x_0 \pm \Delta$ 的形式，这表示被测量的真值在 $(x_0 - \Delta, x_0 + \Delta)$ 的范围之外的可能性（或概率）很小。不确定度是指由于测量误差的存在而对被测量值不能肯定的程度，是表征被测量的真值所处的量值范围的评定。

直接测量时被测量的量值 x_0 一般取多次测量的平均值 $\bar{x}$ ；若实验中有时只能测一次或只需测一次，就取该次测量值 x 。最后表示直接测量结果中被测量的 x_0 时，通常还必须将已定系统误差分量从一次测量值 x 中减去，以求得 x_0 ，即对已定系统误差分量进行修正。如螺旋测微计的零点修正，伏安法测电阻中电表内阻影响的修正，等等。

参考国际计量委员会通过的《BIPM 实验不确定度的说明建议书 INC-1 (1980)》的精神，普通物理实验的测量结果表示中，总不确定度 Δ 从估计方法上也可分为两类分量：A，多次重复测量用统计方法计算出的分量 Δ_A ；B，用其他方法估计出的分量 Δ_B ，它们可用方和根法合成（下文中的不确定度及其分量一般都是指总不确定度及其分量）

$$\Delta = \sqrt{\Delta_A^2 + \Delta_B^2} \quad (1-6)$$

在普通物理实验中对同一量作多次直接测量时，一般测量次数 n 不大于 10，只要测量次数 $n > 5$ ，就可直接取 $\Delta_A = S_x$ ，并把单次测量的标准偏差 S_x 的值当作多次测量中用统计方