

借

21
世纪高等医学院校教材

医用物理学实验

主编 洪洋 俞航



科学出版社
www.sciencep.com

21 世纪高等医学院校教材

医用物理学实验

洪 洋 俞 航 主编

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书是为适应 21 世纪高等医学教育的全新发展和变革的需要由中国医科大学物理学工作者共同编写的,是老师们在教学岗位上长期进行医学物理教学实践的经验积累和改革创新的教育科研成果的结晶。全书以三个版块为框架:即误差理论体系,包括实验设计与数据处理理论;大学物理学计算机模拟实验;大学物理学实物操作实验。后两个框架属于实践操作部分,又包括了四个层次:即设计性实验、综合性实验、计算机模拟实验和生物医学应用实验,其中的生物医学应用实验以医学影像物理学实验为主。因此,本教材既适用于医学院校各专业学生的“医用物理学”实验课教学,生物医学工程和生物信息等专业“普通物理学”实验课教学,也适用于医学影像专业学生的“医学影像物理学”实验课教学使用,同时,还可以提供给从事生物医学和临床医学的科技工作者作为参考书。

图书在版编目(CIP)数据

医用物理学实验/洪洋,俞航主编. —北京:科学出版社,2005. 8

21 世纪高等医学院校教材

ISBN 7-03-015714-1

I. 医… II. ①洪…②俞… III. 医用物理学-实验-医学院校-教材

IV. R312-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 063986 号

责任编辑:裴中惠 黄 敏/责任校对:钟 洋

责任印制:刘士平/封面设计:陈 敬

版权所有,违者必究。未经本社许可,数字图书馆不得使用

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

铁成印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2005 年 8 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2005 年 8 月第一次印刷 印张:10

印数:1—5000 字数:230 000

定价:15.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换(新欣))

前 言

本书是为适应 21 世纪高等医学教育的全新发展和变革的需要而编写的。它是中国医科大学物理学工作者在教学岗位上长期进行医学物理教学实践的经验积累和改革创新的教育科研成果的结晶。多年来,许多医学院校的专家同仁都到过中国医科大学就医用物理学实验和医学影像物理学实验的开设情况进行考察、取经,并深入探讨实验的现存问题和发展趋势。今天,我们把这些经验积累、整体内涵和改革创新成果编写成册并出版发行,不仅为医学院校大学物理实验教学的规范化提供一个平台,而且也可以更好地与兄弟院校进行交流,探索大学物理教育对医学生培养的最佳模式。

医用物理学实验全书以三个版块为框架:即误差理论体系,包括实验设计与数据处理理论;大学物理学计算机模拟实验;大学物理学实物操作实验。后两个框架属于实践操作部分,又包括了四个层次:即设计性实验、综合性实验、计算机模拟实验和生物医学应用实验。

这本教材的编写目的是要使医学生通过大学物理实验课程的学习和训练,全方位地掌握严谨的物理实验方法理论,加强科学思维能力、实际操作能力以及创新能力的培养,并利用计算机充分延伸医用物理实验的深度和广度,达到从理论到实践、从主观到客观、从物理学到医学、从研究到应用的立体化教育目标,以适应现代医学发展的需求。

本教材在编写上有以下几个特点:

1. 在实验项目的覆盖性上,本书既注意了作为一门独立课程的完整性和系统性,也注意了医学教育的特点。实验内容既有基础物理学的力、热、光、电磁部分,近代物理学部分,也有医学物理实验部分和影像物理实验部分。不仅可以作为医学与生物学本科各专业使用的医学物理实验教材,而且还可以作为医学影像专业学生使用的影像物理学实验教材。

2. 对定量研究实验的处理上,本书注意了开发学生智力潜能以及创造能力的培养。在要求学生掌握和应用测量误差与数据处理的基本思想和方法的同时,增加了由学生自行设计实验的内容,包括根据实验误差限设计样本含量,通过现有实验仪器设计新的物理实验等。

3. 从课程设置的目的是出发,本书所选实验内容侧重于基本测量、基本方法和基本技术的训练。在实验过程的设计上,本书体现了由浅入深、循序渐进,注重能力培养的科学思想方法。在每个实验后面有一些思考题,开发学生对所学内容的应用能力。

4. 教材体现了双语教学的特点,配备了英文实验目录和医用物理学实验的英文专业名词注释。

中国医科大学的 12 位教师参加了本教材的编写工作。具体分工为,洪洋(绪论、误差理论与数据处理),俞航(实验十、实验十五、实验二十二、实验二十四),相荣才(实验一、实验二、实验六),李莉(实验三、实验四、实验八),何宁(实验五、实验七),王洁(实验九、实验二十一),潘海军(实验十一、实验十二),张福利(实验十四、实验十六),杨金有(实验十三、实验

十八、实验二十六),王秀芝(实验十九、实验二十),周玲(实验十七),温良(实验二十三、实验二十五)。此外,胡克微同志和武力同志对教材的编写做了大量的工作,原生物物理学教研室的老主任曲直教授也为这本教材提出了许多建设性意见和建议,作者在此一并表示衷心感谢。

本教材适用于医学院校各专业的“医用物理学”实验课教学,也适用于医学影像专业学生的“医学影像物理学”实验课教学使用。同时,还可以提供给从事生物医学和临床医学的科技工作者作为参考书。由于编者水平有限,书中不妥之处在所难免,恳请使用本书的教师和学生予以批评指正。

洪 洋

2005年2月18日

目 录

第一章 绪论	1
第二章 误差理论与数据处理	5
第一节 误差的基本概念	5
第二节 测量值总体的正态分布规律	10
第三节 用样本估计测量值总体	15
第四节 误差的区间估计	17
第五节 误差传递	19
第六节 实验设计与数据处理	22
第七节 有效数字	28
第八节 实验数据的处理方法	30
练习题	36
第三章 设计性实验	38
实验一 铜圆柱密度的测定	38
实验二 酒精黏度的测量	46
实验三 水的表面张力系数的测定	51
实验四 RC 电路时间常数的测量	55
第四章 综合性实验	61
实验五 拉伸法测金属丝的杨氏模量	61
实验六 声速的测量	64
实验七 电介质相对介电常数的测量	69
实验八 电子和场	70
实验九 照相及暗室技术	77
实验十 分光计测钠光波长	80
第五章 计算机模拟实验	88
实验十一 热敏电阻	88
实验十二 偏振光的研究	91
实验十三 电子自旋共振	94
实验十四 油滴法测电子电荷电量	98
实验十五 光电效应法测量普朗克常数	102
实验十六 模拟示波器的使用及频率测定	107
实验十七 螺线管测磁场	111
实验十八 弗兰克-赫兹实验	114

第六章 生物医学应用实验	119
实验十九 人耳听阈曲线的测定	119
实验二十 心功能参数的测量	122
实验二十一 显微摄影	127
实验二十二 磁化水电导率的测量	129
实验二十三 B型超声诊断仪的原理及使用	132
实验二十四 原子核衰变的统计涨落	136
实验二十五 X-CT 图像后处理	139
实验二十六 核磁共振	141
附录	149
一、基本物理常数	149
二、单位制和量纲,国际单位制	149

Catalogue

Chapter 1	Introduction	1
Chapter 2	Error Theory and Data Treatment	5
2.1	Basic Concept on Error	5
2.2	Normal Distribution of the Measurement Population	10
2.3	Estimating Measurement Population by Sample	15
2.4	Interval Estimation of Error	17
2.5	Propagation of Error	19
2.6	Experiment Design and Data Treatment	22
2.7	Getting and Treating the Data	28
2.8	The Method of Curve Changing to Straight Line	30
Chapter 3	Design Experiments	38
3.1	Measurement of the Density of Copper Column	38
3.2	Measurement of the Viscosity of Alcohol	46
3.3	Measurement of the Surface Tension of Liquid	51
3.4	Measurement of RC Time Constant	55
Chapter 4	Integrative Experiments	61
4.5	Determination of Yang's Modulus	61
4.6	Measurement of the Sound Speed	64
4.7	Determination of Relative Electricity Constant	69
4.8	The Electron and the Fields	70
4.9	The Photograph and Technology in Black-Room	77
4.10	Measurement of Sodium Spectrum by the Prism Spectrometer	80
Chapter 5	Modeling Experiments On The Computer	88
5.11	Thermal Resistor Thermometer	88
5.12	Polarization Experiment	91
5.13	Electron Spin Resonance	94
5.14	Determination of Charge By Method of the Oil Drop	98
5.15	Determination of the Plank Constant by the Photoelectric Effect	102
5.16	Determination of Using Oscillograph	107
5.17	Measurement of Magnetic Field by the Solenoid	111
5.18	Frank-Hertz Experiment	114

Chapter 6 Experiments of Medicine Application	119
6.19 Determination of Hearing Threshold Curve of Human Ear	119
6.20 Determination of Heart Function	122
6.21 Microphotograph	127
6.22 Determination of Permeability with Magnetic Water	129
6.23 The Principle of B Model Scan	132
6.24 Determination of Radioactivity	136
6.25 The Image Modeling and Imaging Post Processing	139
6.26 The Image by Nuclear-Magnetic Resonance	141
Appendix	149

第一章 绪 论

一、物理学实验的特点与意义

人们对物质世界各种运动形式基本规律的研究都是以实验为基础,并最终受到实验的检验。物理实验课的基本任务是对学生系统地进行科学实验方法和实验技能的基本训练,培养学生严肃认真的工作作风,实事求是的科学态度,独立进行科学实验研究的方法和能力。它不是理论课的附属,更不是理论课的补充,它具有自己一整套的规律性。所以,与理论相比,大学物理实验课具有很大的独立性。

进入 21 世纪,对学生创新能力的培养已成为大学教育的重要目标之一。实验课是实现这一目标的桥梁。物理学实验的作用不仅在于实验的内容,而且更重要的是实验进行的过程。通过这个途径的学习和训练,同学们既可以掌握知识的内涵,又能了解到知识创造的过程,从而学会学习知识、培养科学思维的方法和分析问题解决问题的能力。

充分利用计算机和信息技术也是大学物理实验的一个重要环节。在实验条件(如场地、温度、放射污染、安全性、甚至经费等)局限的情况下,开设一部分计算机模拟实验是具有时代特征的知识创新和技术创新,不仅丰富了物理学实验的内容,而且还能了解和掌握运用计算机进行模拟的技术和方法。

通过不断探索和实践,我们把大学物理实验教学分为三个体系,即讲授误差理论、计算机平台模拟和具体动手操作,使学生在新型实验课模式下从理论到实践、从传统的规范内容到扩展的计算机模拟,得到系统训练和全面发展。

大学物理实验的内容分为定性和定量实验两大部分。定性实验主要通过物理量的测量和观察掌握基本的实验手段和测量方法;定量实验是在定性实验的基础上,运用所学的误差理论,通过实验数据的处理,最后用区间估计式的形式给出所测真值可能出现的范围和可信程度。对于医学生而言,以其应用目的分类,我们又把大学物理实验分成设计性实验、综合性实验、计算机模拟实验和生物医学应用实验四个部分。设计性实验是让学生通过学习误差理论,根据具体实验对误差限的要求,自行设计测量条件和数据处理方法。综合性实验则要求学生通过重复前人的实验,体会并验证物理学的原理、实验方法和测量技术。计算机模拟实验是将一些现代物理思想和高尖端技术在计算机平台上进行模拟和尝试,扩大物理学习的空间。生物医学应用实验则加强医学与物理学的联系和实际应用,培养学生用数理思想方法分析生命现象的能力。

二、物理学实验的目的和要求

大学物理实验通过实验史料、实验方法以及在生命科学中的应用的讲解和实践,对学生

进行辩证唯物主义世界观和方法论教育,使学生了解科学实验的重要性,明确大学物理实验的地位、作用 and 任务。在实验过程中,培养学生良好的实验作风和操作习惯,爱护公共财物,遵守安全卫生制度,树立科学规范的学风。

在大学物理实验中,要求掌握误差的基本概念和较为系统的理论基础,具有正确处理实验数据的基本能力。包括:误差的概念,直接测量量和间接测量量的不确定度的计算方法,处理实验数据的基本方法等。

学生在进行该门课程的学习和训练时,要自行完成预习、进行实验、撰写实验报告等主要实验程序;能够安装调节简单常用的实验装置,掌握基本的操作技术,比如:零位调节,水平、铅直调节,电路的正确连接,光路的共轴调节等;了解物理实验中常用的测量方法和实验方法,比如:比较、放大、模拟、转换、补偿、平衡和干涉等方法;能够进行一些科学参数的基本测量,比如:长度、密度、温度、时间、热量、电流强度、电压、电阻、电动势、磁感强度、折射率等的测量;了解常用仪器的性能,并掌握其使用方法,比如:计时仪器、测长仪器、测温仪器、称重仪器、变阻器、电表、直流电桥、常用电源、低频信号发生器、示波器、显微镜、分光计、放射性计数仪等。

大学物理开设适量的设计性实验,使学生在给定测量仪器和条件的前提下,进行实验方法、操作过程和测量次数的设计,在运用误差理论进行科学实验方面受到初步的训练。开设一定数量的综合性和应用性实验,有利于学生了解物理实验的技术应用,与所学的医学知识相联系,提高进行综合性实验的能力。开设计算机模拟实验可以使学生利用现代信息技术获得更丰富、更直观的物理学规律的验证和应用计算机技术的训练。

三、物理学实验课的主要教学环节

大学物理实验课分以下三个环节:做好预习、做好实验和写好实验报告。

第一个环节:做好预习

在实验课上,学生必须独立进行实验操作,有些操作步骤必须由学生自己预先拟出;实验测得的数据也必须在自己预先设计好的“原始记录表”中。不做预习,或预习不充分根本无法进行正确的操作,在盲目的状态下甚至容易出现差错或事故。所以,课前预习的好坏是实验中能否取得主动的关键。一旦发现学生没预习,或预习不充分,教师有权取消其进行实验的资格。具体预习要求如下:

- (1) 仔细阅读实验讲义,对实验目的、实验原理要达到深入理解的程度。
- (2) 要求对实验步骤不看讲义就能叙述出来。
- (3) 熟练背诵出该实验的注意事项。
- (4) 做好预习笔记,如要求进行实验设计,必须预先在实验笔记中做出,画好“初测记录表”,教师在课前要提问和逐个进行检查。

第二个环节:做好实验

实验操作需在实验课堂上,在教师指导下由学生独立完成。要求学生到实验室后要遵守有关的规章制度,爱护仪器设备,注意安全。具体要求如下:

- (1) 一进入实验室,学生首先清理实验台和实验环境。
- (2) 按讲义“实验器材”一栏清点实验仪器、设备。在教师提问并做简要讲解之后,方可动手熟悉仪器,比如仪表的准确度、量程,熟悉仪器刻度、标记、端扭的作用,进行零点调节等。

(3) 按“实验步骤”进行操作。电学实验中,先将电源正极或电键断开,再连其他电路,经教师检查后,方可接通电路进行操作。

(4) 数据一定要填写到实验笔记正规的“初测记录表”和“实测记录表”中。测完所有的数据,经教师签字后,需将实验台恢复到实验前的状态。

第三个环节:写好实验报告

学生在实验操作结束后,需做出总结性科学材料,即实验报告。实验报告既要清楚、整洁、重点突出,又要简明扼要。具体要求如下:

- (1) 写明期、班、组、号及姓名和实验日期。
- (2) 写明“实验名称”、“实验目的”和“实验仪器”,“实验仪器”要写明量程和准确度。
- (3) 用自己的话,重点突出,简明扼要地写出“实验原理”,尽可能用公式、符号、线路图或装置图来描述。要突出重点,不要照抄讲义。
- (4) 原始记录、数据处理和计算是实验报告的重要内容,要严格运用误差理论、有效数字和数据处理规则。
- (5) 实验结束的讨论不勉强要求,可写出自己的心得、体会和创见,避免一般化。

附 1 电学实验的操作规程和安全知识

1. 准备 实验前先准备好数据表,并熟悉本组实验仪器。

2. 连线 根据电路图要求摆好元件位置(基本按电路图排列次序,但也要考虑到读数和操作的方便)。然后开始连线,可利用不同颜色的导线来表示电势高低,以便于检查(例如用红色接正极,用黑色接负极等)。导线端头不要有毛散现象。所有的电源最后联入电路。教员同意接通电源前开关一定要断开。

3. 检查 接好电路后,先复查电路联接是否正确,再检查其他的实验准备是否都做妥,例如开关是否断开、电表和电源正负极是否接错、量程是否正确、电势差计的位置是否正确等,最后请教员检查,经同意后才能接通。

4. 通电 在通电合闸时要密切注意仪表反应是否正常,并随时准备在异常时断开开关。

5. 安全 不管电路中有无高压,要养成避免用手或身体接触电路中导体的习惯。并注意有些仪器的接地。

6. 归整 实验完毕,应将电路中仪器拨到安全位置,断开开关,经教员检查数据后再拆线,拆线时应先拆去电源,最后将所有仪器放回原处。

附 2 怎样写实验报告

实验报告可分为三个部分:预习报告、实验记录 and 数据处理。

1. 预习报告 预习报告作为正式报告前面的部分,要求学生在正式做实验之前写好。内容包括:

(1) 目的:说明本实验的目标。

(2) 原理:在理解的基础上,用概括性文字和公式简要阐述本实验基本原理,切忌整篇

抄书,力求做到图文并茂(图系指原理图、电路图或光路图)。

(3) 实验步骤:设计好实验进行的内容、顺序,写出简要的实验步骤。

2. 实验记录 先将实验的原始数据记录在专用的实验数据记录纸上,实验完毕之后再
进行整理。内容包括:

(1) 实验器材:记录实验使用的主要仪器编号和规格,药品、溶液等耗材的种类和用量。

(2) 实验内容和现象的观测记录。

(3) 实验数据:数据记录应做到清晰整洁而有条理(不要用铅笔),尽量采用列表法。在
根据数据特点设计表格时,力求简单直观,分类清晰,便于计算复核。注意:在标题栏中要注
明测量量的单位;实验数据不得任意涂改。

3. 数据处理 这部分工作将在实验后进行,包括:

(1) 作图:按图解法的要求绘制实验曲线。

(2) 计算结果并进行误差分析:计算时要写出公式,再代入数据进行运算。误差分析要
先写出误差公式,要有主要计算过程。

(3) 实验结果:规范化写出实验结果,必要时注明该结果的实验条件。

(4) 讨论:对实验中出现的问题和课后思考题进行说明或讨论,并写出实验心得和建议等。

实验报告要求字迹工整,书写清晰,数据记录规范,图表合格,叙述词语通顺,内容简明
扼要。实验报告尽量用物理实验报告纸书写。

附 3 实验报告格式

大学物理实验报告

实验名称			
班 级		姓 名	
指导教师		时 间	
成 绩		预 习	
		纪 律	
		操 作	
		报 告	
实验目的			
实验仪器			
实验原理			
数 据 表			
实验内容			
数据处理			
实验讨论			
教师评语	签字:		

第二章 误差理论与数据处理

任何科学实验都离不开定性的观察和定量的测量,而在一切定量测量中,结果都不可避免地存在着测量误差(measurement error),这就要求我们必须懂得:如何将测量的误差限制在要求范围内,选择合适的测量方法和适当的测量仪器;如何在测量中尽量减少误差;如何在测量中将得到的原始数据归纳、整理、再加工;测量结束后,如何对测量结果的可信程度给出科学的估计并正确地表达出来。这些都要求实验者必须掌握有关测量误差的一些基本知识和一些必要的数据处理方法。这一点,对医学生来说是至关重要的。

第一节 误差的基本概念

一、测量

大学物理实验不仅要求定性观察各种物理现象,而且更重要的是要找出有关物理量之间的定量关系,因此需要进行测量。测量的意义就是将待测的物理量与一个选作标准的同类量进行比较,以确定它们之间的倍数关系。作为标准的同类量称作单位,倍数称作测量数值。因此,一个物理量的测量值就是测量数值与单位的乘积。物理量的大小是客观存在的,而选择不同的单位时,测量数值则有所不同。单位越大,测量数值越小;反之亦然。

根据《中华人民共和国计量法》规定,物理量的测量均以国际单位制(SI)为国家法定计量单位,即以米(m)、千克(kg)、秒(s)、安培(A)、开尔文(K)、摩尔(mol)、坎德拉(cd)作为基本单位。其他量都是由以上七个基本单位导出的,称作国际单位制的导出单位。

物理测量可以分为两类。一类是直接测量,用仪器仪表直接测得的量称直接测量量。比如,用“尺”量长度,用“表”计时间,用“天平”称质量,用“安培表”测电流等。另一类是间接测量,根据直接测量所得到的数据,依据一定的函数公式,通过计算,得出所需要的结果,叫间接测量量。比如,直接测量出铜圆柱的质量 m , 高度 h 和直径 d 后,根据公式 $\rho = 4m/\pi d^2 h$, 以求铜圆柱密度。在物理量的测量中,绝大多数是间接测量,而直接测量却是一切测量的基础。

二、误差

物理学是一门实验科学,它的研究领域离不开对各物理量所进行的测量。学生做大学物理实验,主要内容也是进行各种测量。待测物理量的实际值和测量值之间总会存在某种差异,这种差异就称为测量误差。

1. 绝对误差与相对误差 我们把被测物理量客观存在的、确定的值称为该物理量的真

值(actual value), 记为 X 。把某次对它测量得到的值称为测量值, 记为 x 。为了表示某一测量的好坏, 我们把测量值 x 减去真值 X 的差, 称为测量值 x 的绝对误差(absolute error), 并记为 e , 即

$$e = x - X \quad (2-1-1)$$

当 $x > X$ 时, e 为正; $x < X$ 时, e 为负; x 越远离 X 时 e 越大。所以, 绝对误差 e 有正、有负, 有大、有小。这里注意, $X - x = -e$, 即 $X - x \neq e$ 。

绝对误差 e 与真值 X 之比, 即

$$\frac{e}{X} = \frac{e}{x - e} \approx \frac{e}{x} \quad (2-1-2)$$

叫做测量值 x 的相对误差(relative error)。

绝对误差是有量纲的量, 应写明具体的单位。相对误差无量纲, 用百分数表示。所以, 绝对误差只能在量纲相同的测量之间进行误差大小的比较。相对误差可用于量纲不同的测量值间误差大小的比较, 如测量单摆的摆长 $l = 620.0 \text{ mm}$, 绝对误差 $e = 0.1 \text{ mm}$, 单摆周期 $T = 1.58 \text{ s}$, 绝对误差 $e = 0.1 \text{ s}$, 相对误差分别为

$$\frac{e}{l} = \frac{0.1}{620.0} = 0.061\%, \quad \frac{e}{T} = \frac{0.1}{1.58} = 6.3\%$$

可见, 周期的相对误差比摆长的相对误差大得多。由 $T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$, 得 $g = 4\pi^2 \frac{l}{T^2}$, 以此公式用单摆法测重力加速度 g 的时候, 为了获得较准确的 g 值, 必须把注意力集中在设法减少周期 T 的误差上。

由于任何测量都不可能做到绝对准确, 因此, 真值实际上是无法得到的, 只能随科学的进步和测量手段的完善, 使测量值越来越逼近真值。

准确度对仪器、仪表是一个重要指标, 有刻度的仪器、仪表的准确度是刻度最小分格表示的物理量, 记为 Δx , 如米尺的准确度 $\Delta l = 1 \text{ mm}$, 秒表 $\Delta t = 0.1 \text{ s}$ 等。下面以测一支铅笔的长为例, 看看尺子的准确度与测量值的关系(见表 2-1-1)。

表 2-1-1 尺子准确度与测量值的关系

仪器	准确度/mm	测量值/mm	仪器	准确度/mm	测量值/mm
皮尺	10	176	量尺	1	176.2
卡尺	0.1	176.18	千分尺	0.01	176.183

2. 运用测量误差理论的意义 既然测量误差的存在对一切测量而言是普遍现象, 那么, 研究测量误差的性质及其产生原因, 研究如何合理有效地减小测量误差对实验结果的影响, 研究如何科学准确地表达含有误差的测量结果, 以及对实验结果怎样客观评价等一系列问题就显得十分重要。正是在这样的背景下, 逐步产生并发展了一门专门的科学, 即测量误差理论。它是在人们把概率论与数据统计理论应用于测量误差的过程中形成并发展起来的一种科学理论。要想深入地讨论测量误差理论, 需要有丰富的实验经验和扎实的概率统计基础知识, 这里只能做简单介绍。学习测量误差理论, 要着重了解其物理意义, 逐步建立误

差分析的思想,这对于做好物理实验尤为重要。

一个大学物理实验自始至终都与测量误差理论密切相关。首先,测量误差理论能帮助我们正确设计实验方案,合理选择实验仪器,以最小的代价取得最好的结果。不能片面要求仪器越高级越好,精度越精越好,条件越稳定越好,测次越多越好等。第二,测量误差理论能帮助我们正确进行实验操作,从而减小各种误差对实验结果的影响。要正确调整仪器装置,注意满足理论上所要求的实验条件,正确使用测量仪器,合理安排操作步骤等。特别需要指出,一个比较复杂的实验,通常只有少数几个物理量是主要的,这几个物理量的准确与否对整个实验结果影响很大,测量误差理论可以帮助我们把握主要矛盾,将精力用于关键的地方。第三,测量误差理论可以帮助我们正确处理数据,科学准确地表达实验结果。在这一环节中,给出的不确定度应力求符合实际,既不能太小,也不能太大。否则,前者会因为夸大了实验结果的准确度而对实际工作造成危害,后者又会因为过分保守而造成浪费。比如,这种保守甚至能导致废弃掉一台本来可以使用的仪器。第四,测量误差理论能帮助我们分析实验结果进行分析判断,得出适当的结论。

三、系统误差与偶然误差

物理测量是在一定的测量条件下进行的。所谓测量条件,即指测量者、测量所用的理论公式、测量仪器、测量方法、测量环境等诸因素组成的测量系统。

1. 系统误差 在同一测量条件(测量系统)下,对同一物理量如果进行无穷多次测量,那么就会得到无穷多个测量值 $x_1, x_2, \dots, x_i, \dots$, 我们把这无穷多个测量值叫做该测量条件下的测量值总体(measurement population), 记为 $[x]$ 。

对总体求平均值称为总体均值(population mean), 记为 μ 。

$$\mu = \frac{m_1 x_1 + m_2 x_2 + \dots + m_i x_i + \dots}{N} = E[x] \quad (2-1-3)$$

其中, m_i 是测量值 x_i 在总体中出现的次数; N 是总测次 ($N \rightarrow \infty$); $E[x]$ 表示对总体求平均。

测量系统不同总体就不同, 总体均值 μ 亦不同。可以证明, 测量系统越完善, 总体均值 μ 就越接近真值 X 。反之, 测量系统越粗糙, 总体均值 μ 就越远离真值 X 。为了表征测量系统的好坏, 我们把总体均值 μ 与真值 X 之差定义为系统误差(systematic error), 记为 e_s , 即

$$e_s = \mu - X \quad (2-1-4)$$

其中, 真值 X 是客观存在, 确定不变的。测量系统确定, 其总体均值 μ 也是确定的, 所以 e_s 的大小和方向(正负)是确定不变的。也就是说, 系统误差是测量系统中某些固定因素引起的。造成系统误差的原因可以归纳为三个方面:

(1) 误差原因为测量仪器的不完善, 仪器不够精密或者安装调整不妥等。例如, 仪器刻度不准, 零点偏位, 天平臂不等长, 砝码未经校准, 工作台不平或仪器倾斜等。

(2) 由于实验理论和方法的不完善, 或忽略了某种固定因素的影响, 所引用的理论与实验条件不符等造成系统误差。

例如, 用膨胀系数较大的金属尺子测木制实验台的边长, 温度升高时尺子涨长, 测量值都将偏小, 总体均值也将随之偏小; 温度降低尺子缩短, 测量值都将偏大, 总体均值也将随之偏大。在温度变化时, 假定实验台边长的真值不变, 则前者 e_s 为负, 后者的 e_s 为正。还有许

多例子可以列举,比如在空气中称质量未考虑空气浮力的影响,量热时未考虑热量的散失,测电压未考虑内阻对电路的影响,标准电池的电动势未做温度修正等。

(3) 由于实验者在生理或心理上的特点,或缺乏经验等所引起的误差。比如有的人眼睛辨色能力较差,有的人习惯从侧面斜视读数等,都会使测量值偏大或者偏小。

系统误差的特点是它的恒定性,是测量系统中某几个固定因素引起的,其大小和方向也是不变的。因此,这种误差是不能用增加测量次数的方法使之减小的。只能对测量系统的各个方面逐一进行研究,找出产生系统误差的原因,有针对性地进行改进。如以上例子中,使用金属尺测量应在恒温下进行,使用秒表前要进行校准。另外,严格校正仪表的零点,可以消除因零点不准所造成的系统误差。

在物理学实验中发现和消除系统误差非常重要,因为它常常是决定实验结果准确程度的主要因素。测量者能否用恰当的方法发现和消除系统误差,决定了实验的整体水平。能够产生系统误差的因素事先并不能都知道,如果处理不好,往往给测量结果带来重大影响,会成为测量的主要误差来源。因此,测量前应对测量系统的各个方面逐一研究,找出可能产生系统误差的因素,有针对性地进行改进。例如,选择有适当准确度的仪器,测量前对仪器仪表进行调试校正等。又如用秒表测单摆周期,使用的秒表不同,即测量系统不同,总体及其均值亦不同,就产生不同的系统误差(见表 2-1-2)。

表 2-1-2 系统误差特点

秒表情况	各测量值	总体均值 μ	μ 与 X 比较	$e_s = \mu - X$
走得快	均偏小	偏小	$\mu < X$	$e_s < 0$
走得慢	均偏大	偏大	$\mu > X$	$e_s > 0$

可见测量仪表不同,系统误差 e_s 就不同。 e_s 反映测量系统的好坏。 e_s 越小,测量系统越好;反之, e_s 越大,测量系统越差。对于消除系统误差没有一个普遍适用的方法,只能靠实验经验的积累对具体问题做具体分析与处理。

2. 偶然误差 在同一测量条件下,对同一物理量进行重复多次测量时,尽管已经精心排除产生系统误差的因素,但每次测量结果并不都一样。例如,用秒表测单摆的周期,手按动秒表时,启动和停止都有一个反应时间,不管测量者多么聚精会神,测量结果仍不相同,不是超前就是落后。这个反应时间带有随机性,这种实验测量的随机性主要来源于人们视觉、听觉和触觉等感官能力的限制以及实验环境中偶然因素的干扰,比如温度、湿度、电源电压的起伏、气流的波动及振动等因素的影响。从个别测量值看起来,它的数值带有随机性,似乎杂乱无章,但如果进行足够多次的测量,就会发现这些数值遵循一定的统计分布规律,可以用概率理论来估算它。

把测量过程中一些偶然的无法控制的随机因素引起的误差称为偶然误差 (accidental error),它在数值上定义为测量值 x 减去总体均值 μ 的差,记为 e_r 。

$$e_r = x - \mu \quad (2-1-5)$$

显然,减少偶然误差的方法,只能是进行多次测量并取平均值,用平均值代替测量值。