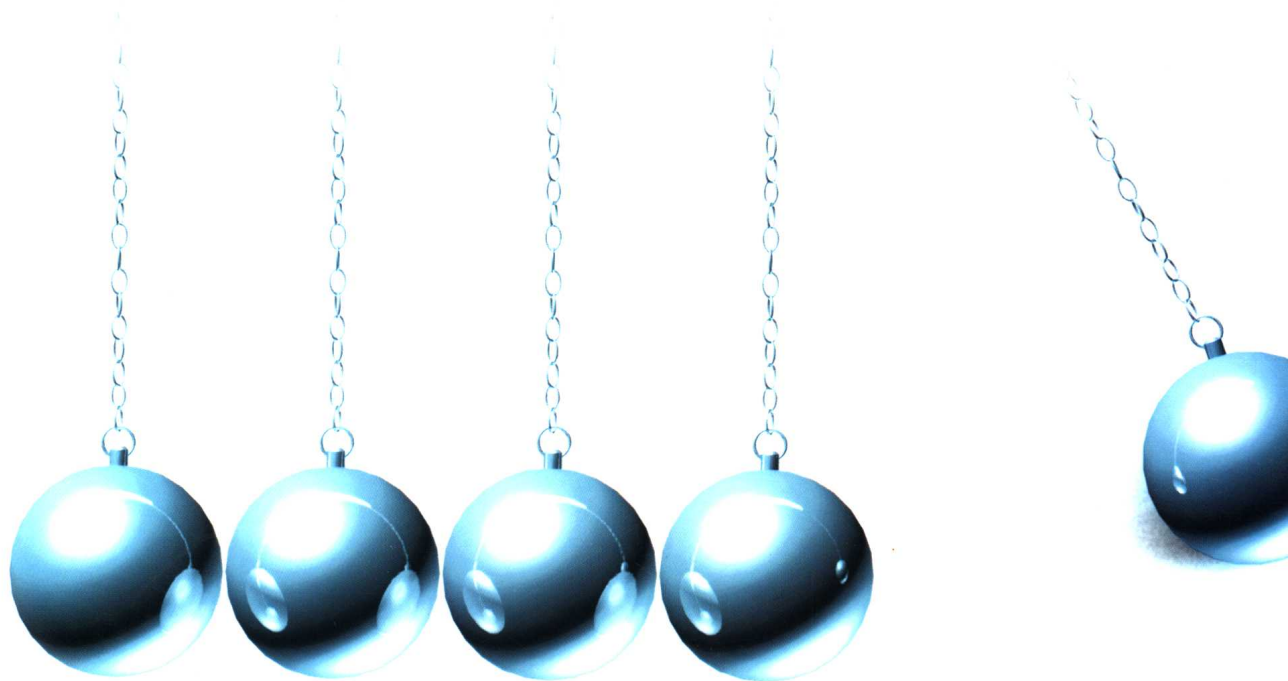




高等学校教材

大学物理实验

张进治 主编 赵小青 刘吉森 副主编



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

高等学校教材

大学物理实验

College Physical Experiments

张进治 主 编
赵小青 刘吉森 副主编

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 · BEIJING

内 容 简 介

本书是根据教育部颁发的《高等工业学校物理实验课程教学基本要求》,结合作者多年物理实验教学实践经验编写而成的,具有“内容新、体系新”的特点,并配有网络版的电子书(e-book)。全书共67个实验,分为基础性实验、综合性实验、设计性实验和选做实验。本书充分反映了近几年来大学物理实验课程教学改革的成果及其发展趋势,注重实验内容的新颖性、综合性和应用性的相结合,在精选基本实验的基础上,又充实了大量具有强烈现代意识和高新技术色彩的、给学生留有较大发展空间的实验题目。另外,在传授知识的同时,注重培养学生的创新精神,因材施教,既保证了对教学要求的贯彻,又促进了个性的发展,为学生提供了一个良好的自主学习空间。

本书可作为高等工业学校各专业的物理实验教学用书,也可供高职高专、电大等学校选用。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

大学物理实验/张进治主编. —北京:电子工业出版社,2003.5

高等学校教材

ISBN 7-5053-8685-9

I. 大… II. 张… III. 物理学—实验—高等学校—教材 IV. 04-33

中国版本图书馆CIP数据核字(2003)第031677号

责任编辑:束传政 冉 哲

印 刷:北京李史山胶印厂

出版发行:电子工业出版社 <http://www.phei.com.cn>

北京市海淀区万寿路173信箱 邮编100036

经 销:各地新华书店

开 本:787×1092 1/16 印张:15.75 字数:401.6千字

版 次:2003年5月第1版 2003年7月第2次印刷

印 数:3 000册 定价:22.00元

凡购买电子工业出版社的图书,如有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系。
联系电话:(010)68279077

前 言

为了适应 21 世纪对高科技人才的“基础扎实、视野开阔、动手能力强、富有创新精神”的要求,多年来,我们努力进行课程建设和教学改革,逐渐形成了自己的教学特色。本书将努力反映近年来物理实验课程建设和教学改革的成果及其发展趋势。

在信息时代、知识经济时代,物理实验应是被新知识、新技术不断填充的开放系统,是不断变化发展的动态体系,而不应被原有的框架所束缚。实验课和理论课既有联系,又有区别。它是真正以学生为主体、教师为主导的课程。它注重的是过程,而不仅是结果的本身。在过程中才能充分展现实验的魅力,使学生从中得到思维的训练和创新能力的开发。为适应新世纪对人才培养的要求,本书做了如下的改革。

(1) 实验内容的改革

物理实验教学改革的核心是教学内容的更新。为了实现教学内容的现代化、模块化,使之与科学技术的发展相适应,与生产和工程技术实际相衔接。在保持实验课原有的物理性质和特色下,增设了一些综合性、应用性的实验项目(如:光纤、液晶、太阳能电池、混沌等),以及一些与“诺贝尔物理奖”有关的实验。对一些需要保留的实验项目进行更新改造,使其内容和方法具有一定的新颖性、综合性和应用性。基本思路是保留这些项目的原有特色,但实验内容有所延伸,测试方法有所改进(如:动态法测杨氏模量、色散曲线的研究等)。总之,通过对物理实验的改革,我们期望能达到更新内容,提高起点,尽量反映现代科技成果的目的。

(2) 课程体系的改革

把实验内容分成四个阶段,以满足不同专业、不同基础和不同能力学生的需要,有利于因材施教,使优秀人才脱颖而出。这四个阶段分别为:基础性实验、综合性实验、设计性实验和选做实验。

(3) 教学手段的改革

①充分利用校园网,建立物理实验网站。把物理实验的要求,注意事项,仪器说明书等资料放到网站中,每个实验都配有用 Flash 制作的动画仿真课件,以解决学生预习的难题,充分扩展了物理实验的时间和空间。

②在实验中更多地利用计算机进行多媒体教学、数据采集和分析,使部分实验实现智能化。

(4) 考核和管理办法的改革

实验课成绩的考核与理论课的考核有很大的不同,应该充分体现出实验课的特点。其目的在于科学全面地考核与评定学生的综合实验能力,培养学生科学严谨、实事求是的作风。通过考核,进一步激发学生学习的主动性、积极性,提高自身综合素质的培养。

每个实验考核的内容包括如下几点:①预习,②动手能力,③独立分析和解决问题的能力,④数据测取和记录的正确性,⑤遵守实验室有关规定的情况,⑥实验报告撰写。教师根据每个学生的课堂表现和实验报告,逐人逐项地进行考核和评定,给出一个量化的结果,并输入计算机。这项改革使学生的实验成绩评定更科学、更合理、更准确。

实验课教学是一项集体工作,无论是教材的编写,还是实验开设的准备工作,都与全体任

课教师和实验技术人员长期的辛勤劳动分不开。本书由张进治、赵小青、李灵杰、铁小匀、王静波、米仪琳(北方工业大学),刘吉森、周新勇(海军后勤学院),常宇(华北电力大学)编写。其中,张进治编写了第1章、第2章、实验5,8,12,21,23,26,27,32,48,49,52,56,58,59,62,63;赵小青编写了实验16,20,22,25,39,42,43,51;李灵杰编写了实验1,3,7,11,36,47;铁小匀编写了实验2,4,6,13,29,30;王静波编写了实验19,38,40,41,50,53;米仪琳编写了实验10,17,24,31,34,37;刘吉森编写了实验9,14,15,18,44,45,46,54,55;周新勇编写了实验64,65,66,67;常宇编写了实验28,33,35,57,60,61。全书由张进治负责策划和统稿。在本书的编写过程中得到了北方工业大学孙福伟书记、吴润恒院长,海军后勤学院黄玉宝副院长、王文才训练部部长、王彦生主任,华北电力大学陈雷副主任、王玲教授的大力支持,黄俊华教授、何艾生教授、邹建成教授阅读了部分书稿,提出了许多修改意见,在此表示由衷的感谢。此外,我们还参阅了许多兄弟院校的有关教材,吸取了宝贵经验,在此也一并表示感谢。

由于编者水平有限,经验不足,加上时间仓促,书中难免有疏漏之处,恳请读者批评指正。

e-book 网址:<http://www.ncut.edu.cn/>→理学院→基础实验中心→e-book

编 者
2003 年 5 月

目 录

第1章 绪论	1
第2章 误差理论和不确定度	4
第3章 基础性实验	28
实验1 物体密度的测量	28
实验2 气垫导轨实验	34
实验3 拉伸法测金属丝的杨氏模量	37
实验4 用三线摆测刚体的转动惯量	41
实验5 直流电桥(惠斯通电桥)测电阻	44
实验6 电位差计的原理和使用	51
实验7 用模拟法测绘静电场	55
实验8 示波器原理和使用	58
实验9 电偶标定与测温	63
实验10 灵敏电流计的特性研究	67
实验11 光路调整和薄透镜焦距的测量	71
实验12 分光计的调节及应用	76
实验13 牛顿环测透镜曲率半径	83
第4章 综合性实验	86
实验14 声速的测定	86
实验15 霍耳效应及磁场测定	89
实验16 用示波器测动态磁滞回线	94
实验17 用衍射光栅测定光波波长	98
实验18 双棱镜干涉	100
实验19 用迈克耳孙干涉仪测波长	103
实验20 光电效应测定普朗克常数	106
实验21 弗兰克-赫兹实验	110
实验22 密立根油滴实验	117
实验23 音频信息的光纤通信	121
实验24 金属材料逸出电位的测定	125
实验25 电介质相对介电常数的测量	130
实验26 太阳能电池的研究	131
第5章 设计性实验	136
实验27 简谐振动的研究	137
实验28 固体线胀系数的测定	138
实验29 电表的改装与校准	139
实验30 伏安法测非线性电阻	140

实验 31	设计和组装欧姆表	141
实验 32	设计和组装热敏电阻温度计	141
实验 33	设计热敏电阻温度开关	142
实验 34	色散曲线的测定	143
实验 35	组装望远镜和显微镜	144
实验 36	单缝衍射	145
实验 37	电位差计校准电表和测定电阻	146
实验 38	细丝直径测定	147
实验 39	用光电效应测薄膜的光吸收系数	148
实验 40	用迈克耳孙干涉仪测钠双线的波长间隔	148
实验 41	用迈克耳孙干涉仪测量白光光源的相干长度和玻璃薄片的折射率	149
实验 42	测定平行电流间的磁场力	150
实验 43	用振动法测阻尼常数	151
第 6 章	选做实验	152
实验 44	固体热导率的测定	152
实验 45	测量铜丝的电阻温度系数	156
实验 46	光的偏振	160
实验 47	黑白摄影与放大	164
实验 48	数码相机与图像处理	167
实验 49	动态法测杨氏模量	170
实验 50	用交流电桥测电容和电感	177
实验 51	势能曲线的模拟研究	181
实验 52	利用分光计测反射光的偏振特性	182
实验 53	用迈克耳孙干涉仪测量压电陶瓷的电致伸长系数	184
实验 54	全息照相	186
实验 55	微波光学实验	189
实验 56	氢原子光谱	193
实验 57	钠原子光谱	198
实验 58	塞曼效应	203
实验 59	721 型分光光度计	210
实验 60	阿贝折射仪测液体折射率	211
实验 61	旋光仪的应用	214
实验 62	RLC 电路的混沌研究	217
实验 63	液晶混沌	220
实验 64	用光电控制计时法测重力加速度	224
实验 65	液体表面张力系数的测定	226
实验 66	电子束的偏转	229
实验 67	用盖革-米勒计数管探测 γ 射线	232

Catalogue

Chapter 1	Introduction	1
Chapter 2	Error Theory and Uncertainty	4
Chapter 3	Fundamental Experiments	28
1.	Measurement of The Density of Objects	28
2.	Air Cushion Slideway	34
3.	Young's Modulus of Elasticity	37
4.	Torsional Pendulum	41
5.	Measurement of Resistance by Wheatstone Bridge	44
6.	Principle of Potentiometer and Its Applications	51
7.	Measurement of Electrostatic Field	55
8.	Principle And Application of Oscillograph	58
9.	Thermocouple Demarcate and Temperature Measure	63
10.	Study of The Characteristy of Sensitive Galvanometer	67
11.	Adjustment of Light Beam and Determination of Focus of The Lens	71
12.	Adjustment of The Prism Spectrometer and its Application	76
13.	Determination of The Radius of Curvature Using Newton's Rings	83
Chapter 4	Integrative Experiments	86
14.	Determination of Sound Velocity	86
15.	Determination of The Magnetic Field Strength by Hall Effect	89
16.	Determination of Dynamic Magnetic Hysteresis Loop Using Oscillograph	94
17.	Measurement of Wave-length by Grating Diffraction Experiment	98
18.	Determination of The Wavelength of Light with Biprism by Interference	100
19.	Adjustment of Michelson Interferometer and Uses	103
20.	Measurement of Planck Constant from The Photoelectric Effect	106
21.	Frank-Hertz Experiment	110
22.	Measurement of The Electrical Charge by Use of Millikan Oil Dots	117
23.	Optical-fiber Communication Principle	121
24.	Determination of Escape Function of Metal	125
25.	Determination of Relative Electricity Constant	130
26.	Measurement of Relative Spectrum Response of Silicon Solar Cell	131
Chapter 5	Design Experiments	136
27.	Study of Spring Vibrator	137
28.	Measurement of Coefficient of Solid Linear Thermal Expansion	138
29.	Reform and Rectify of Ammeter	139

30. Relationship of Electricity Components	140
31. Design and Assemble of Ohm Meter	141
32. Design And Assemble A Thermal Resistor Thermometer	141
33. Design of Temperature Switch of Sensitive	142
34. Determination of The Dispersion Curve	143
35. Assemble of Telescope and Microscope	144
36. Measurement of Wave length by Single – slit Diffraction	145
37. Calibration and Measurement of Ammeter and Resistance by Potentiometer	146
38. Determination of Filament Diameter	147
39. Determination of Absorption Coefficient of Thin-film by The Photoelectric Effect	148
40. Determination of The Wavelength Interval of Natrium Crewel by Michelson Interferometer	148
41. Determination of The Refraction Index of Glass with Michelson Interferometer	149
42. Determination of Magnetic Force of Parallel Current	150
43. Study of Damped Oscillation and Forced Oscillation	151
Chapter6 Deetive Experiments	152
44. Determination of Heat Conductivity	152
45. Determination of Resistance-temperature Coefficient of Brass Wires	156
46. Polarization Experiment	160
47. Photography And Film Development	164
48. Numeral Camera and Image Manipulation	167
49. Determination of Young's Modulus by Dynamic Method	170
50. Determination of Capacitance and Inductance by Alternating Current Bridge	177
51. sim ulate study of Potential Energy Curvilinear	181
52. Determination of Polarized Characteristic of Reflex by The Prism Spectrometer	182
53. Determination of Electrostriction Coefficient of Piezoelectric Ceramic	184
54. Holographic Experiment	186
55. Microwave Optics Experiment	189
56. Study of Spectrum of Hydrogen	193
57. Study of Spectrum of Natrium	198
58. Zeeman Effect	203
59. 721 Spectrophotomter	210
60. Determination of Refractive Index of liquid by Abbe Refractometer	211
61. Application of The Polarimeter	214
62. Study of Chaos Phenomenon in Non-linear Circuits	217
63. Study of Chaos Phenomenon of Liquid Crystal	220
64. Determination of Acceleration of Gravity	224
65. Determination of Surface Rise Force Coefficient of Liquid	226
66. Deflexion of Electron Beam	229
67. Determination of γ -ray by Geiger-müller Tube	232

第 1 章 绪 论

物理实验是大学工科学生进行科学实验训练的一门独立的必修基础课程,是他们进入大学后受到系统实验方法和实验技能训练的开端。它在培养学生运用实验手段去分析、观察、发现以至研究、解决问题的能力方面,以及培养学生的创新能力和创新精神方面都起着重要的作用。

物理实验的作用不仅在于它实验的内容,更重要的是实验进行的过程。在这个过程中,学生们不仅掌握了知识,而且了解到知识创造的过程,从而学会学习,为他们的终身教育打下一个坚实的基础。因为 21 世纪是一个知识激增的时代,任何一个学生都不可能在学校里学到他所学专业的全部知识,他们毕业后都必须不断学习,否则就会落后于时代。因此,终身教育的观念将成为本世纪最具革命性的观念。

1. 本课程的目的和要求

① 通过物理实验史料、实验方法和物理实验在工程技术中的应用的讲解,对学生们进行辩证唯物主义世界观和方法论的教育,使学生们了解科学实验的重要性,明确物理实验课程的地位、作用和任务。

② 在整个实验过程中,培养学生良好的实验习惯,爱护公共财物,遵守安全卫生制度,树立良好的学风。

③ 要求掌握测量误差的基本知识,具有正确处理实验数据的初步能力。其中包括下列内容:测量误差的基本概念,直接测量量的不确定度计算,间接测量量的不确定度计算以及处理实验数据的一些重要方法,如:列表法、作图法、逐差法和一元线性函数的最小二乘法等。

④ 能够自行完成预习、进行实验和撰写实验报告等主要实验程序。能够调整常用实验装置,并基本掌握常用的操作技术,如:零位调整,水平、铅直调整,光路的共轴调整,消视差调节,逐次逼近调节,根据给定的电路图正确接线等。了解物理实验中常用的实验方法和测量方法,例如:比较、放大、转换、模拟、补偿、平衡和干涉等方法。能够进行常用物理量的一般测量,例如:长度、质量、时间、热量、温度、电流强度、电压、电动势、电阻、磁感应强度、折射率等的测量。了解常用仪器的性能,并学会使用方法,例如:测长仪器、计时仪器、测温仪器、变阻器、电表、直流电桥、直流电位差计、通用示波器、低频信号发生器、分光计、常用电源和常用光源等。

⑤ 开设一定数量的应用性或综合性物理实验,以利于同学们了解物理实验的技术应用,提高进行综合实验的能力。

⑥ 开设适量的设计性实验,使同学们在实验方法的设计、测量仪器的选择和配合、测量条件的确定等方面受到初步的训练。

⑦ 开设适量的选做实验,以利于开拓同学们的视野,提高自学和获取知识的能力。

⑧ 在实验教学中充分使用计算机和校园网。

2. 实验课的主要教学环节

实验课与理论课不同,它的特点是学生在教师的指导下自己动手,独立地完成实验任务。

要上好一次物理实验课,要做好以下三个环节的工作。

第一个环节:做好预习。实验课前要把讲义上的实验内容仔细阅读一遍,弄明白这次实验的目的要求、原理、仪器、操作步骤以及应该注意的问题等,写好预习报告。有些实验还要课前自拟实验方案,自己设计电路图、光路图、自拟数据表格等。因此,课前预习的好坏是实验中能否取得主动的关键。

第二个环节:做好实验。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。动手之前要先了解仪器的性能、规格、使用方法和操作规则,不要乱动仪器。调整仪器装置时要仔细认真,一丝不苟,还要注意满足测量公式所要求的实验条件。在整个实验过程中,要手脑并用,要注意培养和锻炼自己的动手能力。实验操作要做到准确、熟练、快速,如在力学实验中如何调水平、调铅垂,在电学实验中如何连接电路,在光学实验中如何调节共轴等,都是一些很基本的操作,都应该熟练掌握。动手能力还表现在能否及时发现并排除实验中可能遇到的某些故障。实验中还要记录好原始数据(就是在测量时直接从仪器上读出来的数据),要一边测量,一边及时记录,要记得准确、清楚、有次序。做完实验,要将实验数据交给教师检查,得到签字认可后,再将仪器收拾复原好,方可离开实验室。

第三个环节:写好实验报告。实验报告是对实验的全面总结,其内容除实验名称外,一般包括:实验目的、实验仪器、原理公式、数据处理、结果表示、讨论等。要用指定的实验报告纸按规定的格式书写实验报告,字迹要清楚,文理要通顺,图表要正确。准确地、完整而简明地表述实验报告中各部分内容,是实验课训练的重要目的之一。另外,要按时交实验报告。

上述三个环节中,第二个环节虽然是主要的,但是对第一、第三个环节也绝不应忽视,只有这三个环节都做好了,才算是上好了物理实验课。

3. 怎样写实验报告

通常,实验报告分为三部分。

第一部分:预习报告。

它作为正式报告前面的部分,要求在正式做实验之前写好。内容包括:

(1) 目的 说明本实验的目的。

(2) 原理摘要 在理解的基础上,用简短的文字和公式扼要地阐述实验原理,切忌整篇照抄,力求做到图文并茂(图是指原理图、电路图或者光路图)。写出实验所用的主要公式,说明式中各物理量的意义和单位以及公式的适用条件(或实验的必要条件)。

(3) 简要的实验步骤。

第二部分:实验记录。

实验的原始数据先记录在专用的“物理实验数据记录页”上,实验完毕后再进行整理。内容包括:

(1) 仪器 记录实验所用主要仪器的编号和规格。记录仪器编号是一个好的工作习惯,便于以后必要时对实验进行复查。记录仪器规格可以使同学们逐步地熟悉它,以培养选用仪器的能力。

(2) 实验内容和现象的观测记录。

(3) 数据 数据记录应做到整洁清晰而有条理(不可用铅笔),尽量采用列表法。在根据数据特点设计表格时,力求简单明了,分类清楚而有条理,便于计算与复核。在标题栏内要求注明单位,数据不得任意涂改。

第三部分：数据处理与计算。

此部分在实验后进行,包括:

- (1) 作图 按图解法要求绘制图线。
 - (2) 计算结果与误差估算 计算时,要写出公式,再代入数值进行运算。误差估算要预先写出误差公式,要有详细的计算过程。
 - (3) 结果 按标准形式写出实验的结果。在必要时,注明结果的实验条件。
 - (4) 作业题 完成教师指定的作业题。
 - (5) 讨论 对实验中出现的说明和讨论,或写出实验心得和建议等。
- 实验报告要求书写清晰,字迹端正,数据记录整洁,图表合格,叙述文理通顺,内容简明扼要。实验报告一律要用专用的物理实验报告本书写。

4. 实验报告格式

实验报告格式参见表 1-1。

表 1-1 大学物理实验报告格式

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	完成本实验的目的				
实验仪器	仪器名称及主要规格(包括量程、分度值、精度等)、实验序号、用具名称				
实验原理	实验依据的原理公式名称、公式中各物理量名称、公式成立的条件,电学线路图(光路图)等				
数 据 表	画出数据表格(要写物理量和单位)				
实验内容	写出简要实验步骤				
数据处理	按要求作图、计算实验数据,并得出结果				
作 业 题					
实验讨论					

指导教师签字:

第 2 章 误差理论和不确定度

2.1 测量与误差

2.1.1 测量

物理实验不仅要定性观察各种物理现象,更重要的是要找出有关物理量之间的定量关系,为此就需要进行测量。测量的意义就是将待测的物理量与一个选来作为标准的同类量进行比较,得出它们之间的倍数关系。作为标准的同类量称之为单位。倍数称为测量数值。由此可见,一个物理量的测量值等于测量数值与单位的乘积。一个物理量的大小是客观存在的,选择不同的单位,相应的测量数值就有所不同。单位愈大,测量数值愈小,反之亦然。

根据《中华人民共和国计量法》有关规定,国家计量局于 1987 年 2 月 1 日发布了国家法定计量单位的名称、符号,并公布了非国家法定计量单位的废除办法,规定以国际单位制(SI)为国家法定计量单位,即以米、千克、秒、安培、开尔文、摩尔、坎德拉作为基本单位,其他量都由以上七个基本单位导出,称为国际单位制的导出单位,并规定 1991 年起实行国家法定计量单位。

测量可分为两类。第一类是直接测量,如用“尺”量长度,以“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,是根据直接测量所得到的数据,根据一定的公式,通过运算,得出所需要的结果,例如直接测出单摆的长度 L 和单摆的周期 T 后,应用公式 $g = 4\pi^2 L / T^2$,以求重力加速度 g 。在物理量的测量中,绝大部分是间接测量,但直接测量是一切测量的基础。不论直接测量或间接测量,都需满足一定的实验条件,按照严格的操作方法及正确地使用仪器,才能得出正确的结果。因此,在实验过程中,一定要了解实验的目的,正确地使用仪器,细心地进行操作、读数和记录,以达到巩固理论知识和加强实验技能训练的目的。

2.1.2 误差

1. 测量误差的普遍存在

物理学是一门实验科学,对它的研究离不开对各种物理量进行的测量。学生做物理实验,其主要内容也是进行各种测量。每一个待测物理量在一定客观条件和状态下所具有的真实大小,称之为该物理量的真值。进行测量时,由于理论的近似性,实验仪器分辨率或灵敏度的局限性,环境条件的不稳定性等因素的影响,测量结果总不可能绝对准确。待测物理量的真值同测量值之间总会存在某种差异,这种差异就称为测量误差。于是定义如下:

$$\text{测量误差}(\delta) = \text{测量值}(x) - \text{真值}(T_x)$$

$$\text{相对误差}(E_r) = \frac{\delta}{T_x} \times 100\%$$

由测量所得的一切数据,都毫无例外地包含有一定数量的测量误差。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,但却永远不会降低到零值。

2. 学习测量误差理论的意义

既然测量误差的存在是一切测量中的普遍现象,那么,研究测量误差的性质和产生的原因,研究如何有效地减小测量误差对实验结果的影响,研究如何科学地表达含有误差的测量结果,以及对实验结果如何评价等一系列问题就显得十分重要。也正是在这样的背景下,产生并发展了一门专门的科学,这就是测量误差理论。它是人们把概率论与数据统计理论应用于测量误差的研究中形成并发展起来的一种科学理论。要想深入地讨论它,需要有丰富的实验经验和较多的概率统计知识,这里只能对其做些简单介绍。学习误差理论,要着重了解它的物理意义,逐步建立起误差分析的思想,这对于做好物理实验是非常重要的。

一个物理实验自始至终都与测量误差理论有密切的关系。首先,测量误差理论可以帮助我们正确地设计实验方案,合理地选择实验仪器,以使用最小的代价取得最好的结果。不能片面地要求仪器越高级越好,环境条件越稳定越好,测量次数越多越好等。第二,测量误差理论可以帮助我们正确地进行实验操作,从而减小误差对实验结果的影响。要正确地调整仪器装置,注意满足理论所要求的实验条件,正确地使用仪器,合理安排操作步骤等。特别值得指出的是,一个比较复杂的实验,往往只有少数几个物理量是主要的,它们的准确与否对结果影响很大,测量误差理论可以帮助我们抓住主要矛盾,把精力用在关键的地方。可以说,实验过程的每一步操作都与测量误差理论密切相关。第三,测量误差理论可以帮助我们正确处理数据,科学地表达实验结果。在表达实验结果时,给出的不确定度要力求符合实际,既不能太小,也不能太大。否则,前者由于夸大了实验结果的准确度有可能对实际工作造成危害,后者又由于过分保守有可能造成浪费,比如它可能导致废弃使用一台本来可以使用的仪器。第四,测量误差理论可以帮助我们对实验结果进行分析判断,从而得出适当的结论。

2.1.3 误差的分类及其特点

测量误差按其产生的原因与性质可分为系统误差、随机误差和过失误差三大类。

1. 过失误差(错误)

在测量中可能出现过失误差,即错误。如读数错误、记录错误、操作错误、估算错误等。错误不属于正常的测量工作范畴,应当尽量避免。克服错误的办法,除端正工作态度,严格工作方法外,可用与另一次测量结果相比较的办法发现并纠正它,或者运用异常数据剔除准则来判别因过失而引入的异常数据,并加以剔除。

2. 系统误差

在相同条件下,多次测量同一个物理量时,测量值对真值的偏离(包括大小和方向)总是相同的,这类误差称为系统误差。造成系统误差的原因有下列3个方面。

(1) 由于测量仪器的不完善,仪器不够精密或安装调整不妥,如刻度不准、零点不对、砝码未经校准、天平臂不等长、应该水平放置的仪器没有放水平等。

(2) 由于实验理论和实验方法的不完善,所引用的理论与实验条件不符,如在空气中称质量而没有考虑空气浮力的影响,测长度时没有考虑温度对测量工作的影响,量热时没有考虑热量的散失,测电压时未考虑电压表内阻对电路的影响或标准电池的电动势未做温度修正等。

(3) 由于实验者生理或心理特点、缺乏经验等而引入的误差,例如有的人习惯于侧坐斜视读数,有的人眼睛辨色能力较差等,都会使测量值偏大或偏小。

系统误差的特点是恒定性。不能用增加测量次数的方法使它减小。在实验中发现和消除系统误差是很重要的,因为它常常是影响实验结果准确程度的主要因素。能否用恰当的方法发现和消除系统误差,是测量者实验水平高低的反映;但是又没有一种普遍适用的方法,主要是靠对具体问题做具体的分析与处理以及实验经验的积累与丰富。学生要在实验中逐步学习和培养这方面的能力,本书将在今后的实验教学中适当的地方介绍这方面的知识。

如果能够确定系统误差的数值,就应该把它从实验结果中加以扣除,消除它的影响;或者说,把系统误差的影响减小到偶然误差的范围以内,这种数值已知的系统误差称为“已定系统误差”。还有一类系统误差,只知道它存在于某个大致范围,而不知道它的具体数值,称之为“未定系统误差”,例如仪器的允差就属于这一类。以砝码为例,一个名义质量为 100g 的三等砝码,它的质量允差为 $\pm 2\text{mg}$,这意味着:凡是质量在 99.998~100.002g 之间的砝码都被当做是 100g 砝码的合格产品。对于一个 100g 砝码,在没有经过校准以前,就不能知道这一系统误差的数值,我们便说它含有未定系统误差。未定系统误差随实验条件的变化往往具有一定程度的随机性质,因而它也是随机误差,可以对它进行概率估计。

3. 随机误差(又称偶然误差)

在相同条件下,对同一物理量进行重复多次测量,即使系统误差减小到最小程度之后,测量值仍然会出现一些难以预料和无法控制的起伏,而且测量值误差的绝对值和符号是随机变化的,这种误差称为随机误差。

随机误差主要来源于人们视觉、听觉和触觉等感觉能力的限制以及实验环境偶然因素的干扰。例如温度、湿度、电源电压的起伏、气流波动以及振动等因素的影响。从个别测量值来看,它的数值带有随机性,好像杂乱无章。但是,如果测量次数足够多的话,就会发现随机误差遵循一定的统计规律,可以用概率理论来估算它。

随机误差出现的分布规律有:高斯分布(又称正态分布)、 t 分布、均匀分布以及反正弦分布等。这里仅简单介绍高斯分布和均匀分布。

(1) 高斯分布(又称正态分布)

实践表明,大多数偶然误差(其中包括我们以后经常遇到的多次测量的算术平均值的偶然误差以及间接测量结果的偶然误差)都可以被认为近似地服从正态分布。正态分布是一种很重要的概率分布。服从正态分布的偶然误差往往是大量的、微小的、互相独立的因素综合作用的结果。正态分布的概率密度函数为:

$$f(\delta) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{\delta^2}{2\sigma^2}} \quad (2.1-1)$$

且

$$\int_{-\infty}^{\infty} f(\delta) d\delta = 1$$

高斯分布的特征可以用高斯分布曲线形象地表示出来,见图 2.1-1(a)。横坐标为误差 δ ,纵坐标为误差的概率密度分布函数 $f(\delta)$ 。式(2.1-1)中的 σ 是一个与实验条件有关的常数,称为标准误差。其值为:

$$\sigma = \lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \delta_i^2}{n}} \quad (2.1-2)$$

式中, n 为测量次数, 各次测量值的随机误差为 $\delta_i, i = 1, 2, 3, \dots, n$ 。

服从高斯分布规律的随机误差具有下列 4 大特征。

- ① 单峰性。绝对值小的误差出现的可能性(概率)大, 大误差出现的可能性小。
- ② 对称性。大小相等的正误差和负误差出现的机会均等, 对称分布于真值的两侧。
- ③ 有界性。非常大的正误差或负误差出现的可能性几乎为零。
- ④ 抵偿性。当测量次数非常多时, 正误差和负误差相互抵消, 于是, 误差的代数和趋向于零。

测量值的随机误差出现在区间 $(\delta, \delta + d\delta)$ 的可能性(概率)为 $f(\delta) d\delta$, 即图 2.1-1(a) 中阴影内所包含的面积元。

由式 2.1-1 可知, 随机误差正态分布曲线的形状取决于 σ 值的大小, 如图 2.1-1(b) 所示。 σ 值愈小, 如图 2.1-1(b) 中 σ_2 , 分布曲线愈陡, 峰值愈高, 说明绝对值小的误差占多数, 且测量值的重复性好, 分散性小; 反之, σ 值愈大, 如图 2.1-1(b) 中 σ_1 , 曲线愈平坦, 峰值愈低, 说明测量值的重复性差, 分散性大。标准误差反映了测量值的离散程度。

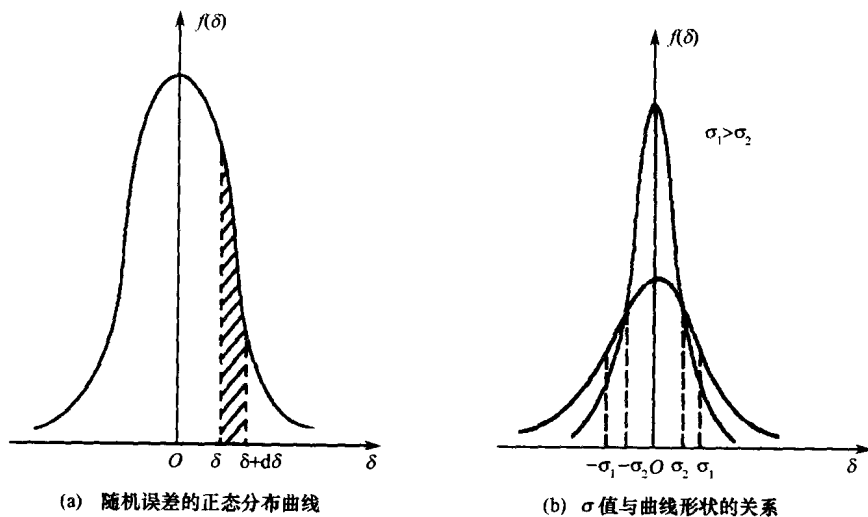


图 2.1-1 随机误差正态分布

由于 $f(\delta) d\delta$ 是测量值随机误差出现在小区间 $(\delta, \delta + d\delta)$ 的可能性(概率), 那么, 测量值误差出现在区间 $(-\sigma, \sigma)$ 内的可能性(概率)就是

$$P(-\sigma < \delta < \sigma) = \int_{-\sigma}^{\sigma} f(\delta) d\delta = \int_{-\sigma}^{\sigma} \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{\delta^2}{2\sigma^2}} d\delta = 68.3\%$$

这说明对任一次测量, 其测量值误差出现在区间 $(-\sigma, \sigma)$ 内的可能性(概率)为 68.3%。也就是说, 假如我们对某一物理量在相同条件下进行了 1 000 次测量, 那么, 测量值误差可能有 683 次落在此区间内。这里要特别注意标准误差的统计意义, 它并不表示任一次测量值的误差就是 $\pm \sigma$, 也不表示误差不会超出 $\pm \sigma$ 的界限。标准误差只是一个具有统计性质的特征量, 用以表征测量值的离散程度。

类似地, 可以计算在相同条件下对某一物理量进行多次测量, 其任意一次测量值的误差落

在区域 $(-3\sigma, 3\sigma)$ 的可能性(概率),其值为

$$P(-3\sigma < \delta < 3\sigma) = \int_{-3\sigma}^{3\sigma} f(\delta) d\delta = \int_{-3\sigma}^{3\sigma} \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{\delta^2}{2\sigma^2}} d\delta = 99.7\%$$

也就是说,在1000次测量中,可能有3次测量值的误差绝对值会超过 3σ 。在通常的有限次测量情况下,测量次数很少超过几十次,因此,测量值误差超过 $\pm 3\sigma$ 范围的情况几乎不会出现,所以把 3σ 称为极限误差。

由于测量误差的存在,真值实际上是无法测得的。根据随机误差的正态分布规律,测得值偏大或偏小的机会相等,即绝对值相等的正负误差出现的概率是相等的。因此,在排除掉系统误差后,各次测得值的算术平均值为:

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \cdots + x_n}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (2.1-3)$$

且
$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - T_x) = 0$$

这个算术平均值必然最为接近被测量的真值,而且当测量次数趋于无限多($n \rightarrow \infty$)时,算术平均值将无限接近真值,所以算术平均值是真值的最佳估计值。

(2) 算术平均值的标准误差

我们通过多次重复测量,获得了一组数据,并把求得的算术平均值 $\bar{x}$ 作为测量结果。但是,如果我们在完全相同的条件下再重复测量该被测量时,由于随机误差的影响,不一定能得到完全相同的 $\bar{x}$,这表明算术平均值本身具有离散性。为了评定算术平均值的离散性,我们引入算术平均值的标准误差 $\sigma_{\bar{x}}$,可以证明

$$\sigma_{\bar{x}} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (2.1-4)$$

式中, n 为重复测量次数。算术平均值的标准误差表示算术平均值的误差(即 $\bar{x} - T_x$)落在区间 $(-\sigma_{\bar{x}}, +\sigma_{\bar{x}})$ 之内的概率为68.3%,或者说区间 $(\bar{x} - \sigma_{\bar{x}}, \bar{x} + \sigma_{\bar{x}})$ 包含真值 T_x 的概率为68.3%。

由式(2.1-4)可得, $\sigma_{\bar{x}}$ 是测量次数 n 的函数,测量次数越多,算术平均值的标准误差越小,所以多次测量提高了测量的精度。但也不是测量次数越多越好。因为 n 的增大只对随机误差的减小有作用,对系统误差则无影响,而测量误差是随机误差与系统误差的综合。所以,增加测量次数对减小误差的价值是有限的。其次,由于 $\sigma_{\bar{x}}$ 与测量次数 n 的平方根成反比,若 σ 一定时,当 $n > 10$ 以后, $\sigma_{\bar{x}}$ 随测量次数 n 的增加而减小得很缓慢。另外,如果测量次数过多,观测者将产生疲劳,测量条件也可能出现不稳定,因而有可能出现增加随机误差的趋势。实际上,只有改进实验方法和仪器,才能从根本上改善测量的结果。

(3) 标准偏差

真值一般是无法测得的,因此前面对误差的讨论只有理论上的价值。下面我们讨论误差的实际估算方法。

由于算术平均值最接近真值,因此可以用算术平均值参与对标准误差的估算。我们常用如下的贝塞尔公式去估算标准误差