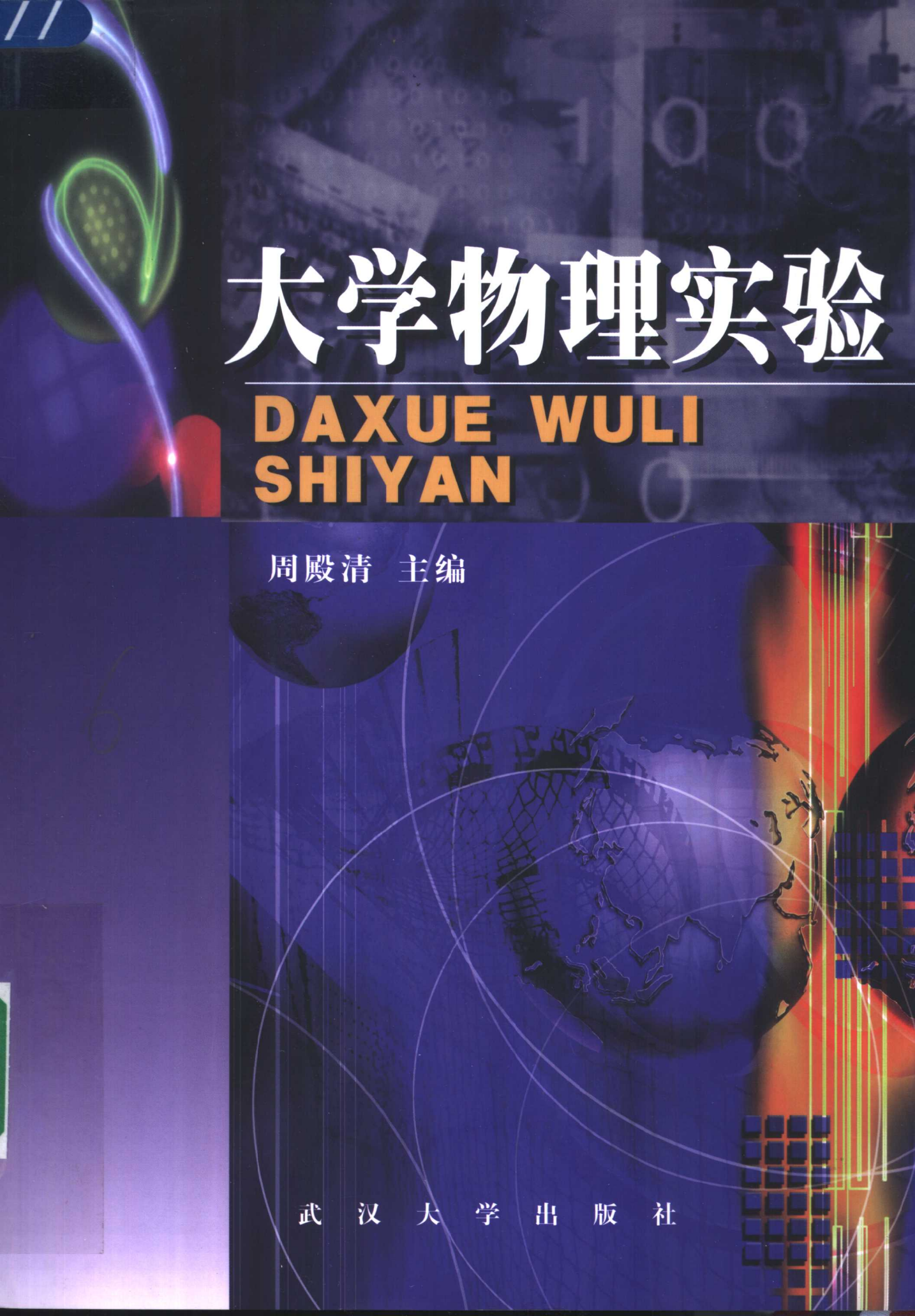




大学物理实验

**DAXUE WULI
SHIYAN**

周殿清 主编

武 汉 大 学 出 版 社



本书是武汉大学基础物理实验室在长期教学实践的基础上总结教学经验编写而成的。

全书共分为五章,第一章讲述测量误差、不确定度和数据处理的基本知识;第二章至第四章编入力学、热学、电磁学和光学共 54 个实验;第五章编排了 29 个综合与设计性实验;书末的附表介绍了有关的物理常数。

本书可作为综合性大学、高等师范院校物理类各专业以及工科大学有关系、科的实验教学用书或实验教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

大学物理实验/周殿清主编. —武汉: 武汉大学出版社, 2002. 6

ISBN 7-307-03506-5

I. 大… I. 周… III. 物理学—实验—高等学校—教材 IV. O04-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 015604 号

责任编辑: 史新奎

责任校对: 黄添生

版式设计: 支 笛

出版: 武汉大学出版社 (430072 武昌 珞珈山)

(电子邮件: wdp4@whu.edu.cn 网址: www.wdp.whu.edu.cn)

发行: 新华书店湖北发行所

印刷: 华中科技大学印刷厂

开本: 787×1092 1/16 印张: 29.75 字数: 719 千字

版次: 2002 年 6 月第 1 版 2002 年 6 月第 1 次印刷

ISBN 7-307-03506-5/O · 259 定价: 41.00 元

版权所有, 不得翻印; 凡购我社的图书, 如有缺页、倒页、脱页等质量问题, 请与当地图书销售部门联系调换。

前 言

近十多年来,随着科学技术的迅猛发展和实验教学改革的不断深入,普通物理实验课的教学从实验内容到实验技术都在不断更新变化。新概念、新方法、新的实验技术和科研领域中的新成果已逐步在物理实验课中得到反映。本书是我们在多年教学实践的基础上,经过反复实践、积累经验、不断改进、充实完善编写而成的。本书可作为综合性大学或师范院校物理类专业普通物理实验课程的教材,也可供理科非物理专业和工科类专业的物理实验课程选用。

全书共分为五章,第一章讲述了测量误差、不确定度和数据处理的基础知识,所涉及的内容以本课程必须掌握的基本要求为主,个别地方略有扩充。第二章到第四章为基本实验,共选编了54个力学、热学、电磁学和光学实验,其中,有些实验包括多个使用不同测量方法和装置的实习内容,以供选择。第五章为综合与设计性实验(共选编了29个实验),这是在学生做了一定数量的基本实验,能对实验方法、仪器使用等方面作出恰当评价后,为了培养学生自主地进行科学研究工作的能力而设置的。设计性实验只提出研究对象、要求,给予适当的提示,主要让学生自行考虑,确定实验方法、选择合适的仪器设备和设计一定的实验程序;综合实验则要求学生自行综合已掌握的知识,或者学习某些学科的交叉知识,解决某一实际问题。这样,既保证了基本训练,又提高了物理实验的综合性和实用程度,促使学生更积极地完成实验。

考虑到物理实验课的独立性和面向低年级学生的特点,对于基本实验,编写时力求将实验原理叙述清楚,计算公式推导完整,使学生在实验预习时掌握理论依据;实验内容与步骤亦尽可能具体,以加强对基本实验技能和基本实验方法的训练和指导。对于常用仪器(如示波器、分光计等)安排在多个实验中反复使用,使学生能正确熟练地掌握这些常用仪器的调节和使用方法。一般地说,一个基本实验的课堂实习任务可在3~4学时内完成,部分实验有多个实习内容,教师安排时可进行取舍,也可供学有余力的优秀学生选做。对于综合与设计性实验,编写时不局限在统一的格式上。有的重点放在新概念、新思路或原理的阐述上(如高温超导材料的导电性、等色谱、吸收谱、液晶相变、光导纤维等);有的则不过分强调理论上的完整,而将主要内容放在实验方法和技巧的指导上(如计算机应用类实验,以及力、热、电、磁、光传感器特性与应用等);有的设计性实验,只提出实验任务和基本要求,让学生查阅相关资料,自行设计实验方案,选择仪器用具,完成实验测试,以更多地发挥学生的主观能动性和创造性。这部分实验,根据各题目内容的不同一般可安排课内6~12学时完成。当然,也允许有兴趣的学生利用课外开放时间进一步深入探索。多数实验后附有思考题,以引导学生在实验后进一步分析讨论,巩固和扩大所学知识。

实验教材离不开实验室的建设和发展,经过几十年的教学实践,作过多次调整、更新和扩充,我们才达到目前的规模和水平。这里面凝聚了教师和实验技术人员的智慧和劳动。

本书实际上是一项集体创作。多数实验题目都包含有许多同志先后的贡献,这里难以逐一记载他们的业绩。1980年以来参加过原实验教材编写工作的主要人员,除这次参加改编者以外,还有张成顺、刘祖荫、李光华、李玉传、黄晓华、招倩儿等老师。参加本书改编和修订工作的有周殿清(绪论、第一章、第四章以及第五章实验 5-11~实验 5-29)、王承彦(第二章、第五章实验 5-1~实验 5-4)、胡绥萍(第三章电磁学实验基本知识,实验 3-1,实验 3-3~实验 3-14,3-16,实验 5-5~实验 5-8)、尹邦勇(实验 3-2,3-3,3-15,3-17,3-18)、余祖兴(实验 5-9,5-10)。

本书在编写过程中征求了许多实验指导教师的意见,参考并吸收了兄弟院校的有关资料和经验;在本书的编写和出版过程中得到了武汉大学教务部、物理科学与技术学院和武汉大学出版社的大力支持,借此表示衷心的感谢。

由于编者水平有限,编写时间仓促,书中难免有疏漏谬误之处,恳请读者批评指正。

编 者

2002 年 2 月于武汉大学

目 录

绪 论	1
第一章 测量误差、不确定度及数据处理的基础知识	4
§ 1-1 测量误差的基本知识	4
§ 1-2 不确定度的基本概念	10
§ 1-3 直接测量结果与不确定度的估算	12
§ 1-4 间接测量结果与不确定度的估算	15
§ 1-5 有效数字及其运算规则	18
§ 1-6 实验数据处理的一般方法	22
附录 常用仪器的仪器误差	31
第二章 力学与热学实验	37
实验 2-1 长度的测量及圆柱体标准偏差的计算	37
实验 2-2 自由落体运动的研究	43
实验 2-3 随机误差的正态分布 ——单摆周期的测量	46
实验 2-4 气垫导轨上的实验	48
实验 2-5 刚体转动惯量的测定	55
实验 2-6 音叉的受迫振动	59
实验 2-7 用伸长法测钢丝的杨氏模量	62
实验 2-8 声速的测定	65
实验 2-9 用稳态平板法测定不良导体的导热系数	71
实验 2-10 用混合法测固体的比热容	74
实验 2-11 热电偶温度计的标度	77
实验 2-12 空气密度的测定	81
实验 2-13 液体粘滞系数的测定	87
实验 2-14 冰的比溶解热的测定	90
实验 2-15 用拉脱法测液体的表面张力系数	94
实验 2-16 金属线膨胀系数的测定	97
第三章 电磁学实验	101
电磁学实验基本知识	101
实验 3-1 伏安法测晶体二极管特征	110

实验 3-2	直流电桥测电阻	113
实验 3-3	用补偿法测量电压、电流和电阻	117
实验 3-4	静电场的模拟与描绘	123
实验 3-5	RLC 串联电路的测量与分析	127
实验 3-6	交流电路中功率和功率因数的测量	133
实验 3-7	交流电桥	137
实验 3-8	交流电路的谐振	142
实验 3-9	示波器的原理及应用	149
实验 3-10	RLC 电路的稳态特性	157
实验 3-11	RLC 电路的暂态特性	165
实验 3-12	冲击法测电容器的充放电曲线和漏电阻	172
实验 3-13	冲击法测螺线管轴线上各点的磁感应强度	178
实验 3-14	铁磁物质磁化特性曲线的测定	186
实验 3-15	用磁聚焦法测电子荷质比	190
实验 3-16	霍尔效应	193
实验 3-17	弱电流测量(夫兰克-赫兹实验)	200
实验 3-18	CCD 微机密立根油滴实验	203
第四章 光学实验		209
光学实验基本知识		209
实验 4-1	薄透镜焦距的测定	223
实验 4-2	透镜组基点的测定	228
实验 4-3	分光计的调节和使用	234
实验 4-4	用阿贝折射仪测定物质的折射率	245
实验 4-5	显微镜	249
实验 4-6	摄影技术	254
实验 4-7	用双棱镜测定光波波长	260
实验 4-8	等厚干涉的应用	265
实验 4-9	迈克耳孙干涉仪	268
实验 4-10	法布里-珀罗干涉仪	274
实验 4-11	单缝衍射的光强分布及缝宽测定	278
实验 4-12	衍射光栅	281
实验 4-13	偏振光的分析	284
实验 4-14	物质旋光性质的研究	289
实验 4-15	小型摄谱仪及其应用	292
实验 4-16	单色仪及其使用	299
实验 4-17	全息照相	305
实验 4-18	阿贝成像原理与空间滤波	312
实验 4-19	超声光栅	316

实验 4-20	光电效应	320
第五章 综合与设计性实验		325
实验 5-1	易溶于水的颗粒状物质的密度测定	325
实验 5-2	用动态法测定金属的杨氏模量	326
实验 5-3	传感器的原理与应用	328
实验 5-4	力学、热学实验中的微机应用	334
实验 5-5	简易万用电表的设计及校准	343
实验 5-6	小功率直流稳压电源的设计与制作	347
实验 5-7	用示波器测量铁磁材料的磁滞回线	347
实验 5-8	周期函数的傅里叶分析	350
实验 5-9	高温超导体超导电性的测量	352
实验 5-10	低维铜青铜导体 Peierls 相变点的测定	356
实验 5-11	光学材料折射率的测定	359
实验 5-12	内调焦望远镜的组装及放大倍率的测定	361
实验 5-13	照相乳剂的感光特性与科技摄影	364
实验 5-14	空气折射率的测定	372
实验 5-15	等色谱及其应用	376
实验 5-16	光源的时间相干性与空间相干性	378
实验 5-17	铍玻璃吸收谱的测定	382
实验 5-18	全息光栅的制作及其参数测定	385
实验 5-19	像面全息与彩虹全息	388
实验 5-20	全息干涉计量	394
实验 5-21	激光散斑照相法测定钠光波长	400
实验 5-22	薄膜厚度的测量	403
实验 5-23	薄膜的实折射率和厚度及金属复折射率的测量	408
实验 5-24	用偏光显微镜研究液晶的相变及光学特性	421
实验 5-25	光学纤维特性参数的测量	433
实验 5-26	光纤温度传感特性的研究	436
实验 5-27	声光调制与光速测量	438
实验 5-28	电光调制	443
实验 5-29	磁光调制	448
附表		454
附表 1	国际单位制(SI)的基本单位	454
附表 2	具有专门名称的国际单位制导出单位	454
附表 3	部分已废除的单位	455
附表 4	常用基本物理常量	455
附表 5	海平面上不同纬度处的重力加速度	456

附表 6	某些元素及无机化合物的密度	456
附表 7	某些液体的密度	456
附表 8	水在不同温度时的密度	456
附表 9	水在不同压强 p 下的沸点 t	457
附表 10	空气的相对湿度与干湿泡温度计温差的关系	457
附表 11	水的饱和蒸汽压(mmHg)与温度的关系	460
附表 12	不同温度下干燥空气中的声速	462
附表 13	铜-康铜热电偶分度	462
附表 14	一些物质的折射率	463
附表 15	一些常用谱线波长	464
附表 16	一些物质的旋光率	466
参考文献		467

1. 实验目的	468
2. 实验原理	468
3. 实验仪器	468
4. 实验步骤	468
5. 实验数据	468
6. 实验结果	468
7. 实验讨论	468
8. 实验报告	468
9. 实验小结	468
10. 实验思考题	468
11. 实验参考文献	468
12. 实验附录	468
13. 实验参考文献	468
14. 实验附录	468
15. 实验参考文献	468
16. 实验附录	468
17. 实验参考文献	468
18. 实验附录	468
19. 实验参考文献	468
20. 实验附录	468
21. 实验参考文献	468
22. 实验附录	468
23. 实验参考文献	468
24. 实验附录	468
25. 实验参考文献	468
26. 实验附录	468
27. 实验参考文献	468
28. 实验附录	468
29. 实验参考文献	468
30. 实验附录	468
31. 实验参考文献	468
32. 实验附录	468
33. 实验参考文献	468
34. 实验附录	468
35. 实验参考文献	468
36. 实验附录	468
37. 实验参考文献	468
38. 实验附录	468
39. 实验参考文献	468
40. 实验附录	468
41. 实验参考文献	468
42. 实验附录	468
43. 实验参考文献	468
44. 实验附录	468
45. 实验参考文献	468
46. 实验附录	468
47. 实验参考文献	468
48. 实验附录	468
49. 实验参考文献	468
50. 实验附录	468
51. 实验参考文献	468
52. 实验附录	468
53. 实验参考文献	468
54. 实验附录	468
55. 实验参考文献	468
56. 实验附录	468
57. 实验参考文献	468
58. 实验附录	468
59. 实验参考文献	468
60. 实验附录	468
61. 实验参考文献	468
62. 实验附录	468
63. 实验参考文献	468
64. 实验附录	468
65. 实验参考文献	468
66. 实验附录	468
67. 实验参考文献	468
68. 实验附录	468
69. 实验参考文献	468
70. 实验附录	468
71. 实验参考文献	468
72. 实验附录	468
73. 实验参考文献	468
74. 实验附录	468
75. 实验参考文献	468
76. 实验附录	468
77. 实验参考文献	468
78. 实验附录	468
79. 实验参考文献	468
80. 实验附录	468
81. 实验参考文献	468
82. 实验附录	468
83. 实验参考文献	468
84. 实验附录	468
85. 实验参考文献	468
86. 实验附录	468
87. 实验参考文献	468
88. 实验附录	468
89. 实验参考文献	468
90. 实验附录	468
91. 实验参考文献	468
92. 实验附录	468
93. 实验参考文献	468
94. 实验附录	468
95. 实验参考文献	468
96. 实验附录	468
97. 实验参考文献	468
98. 实验附录	468
99. 实验参考文献	468
100. 实验附录	468

绪 论

物理学从本质上说是一门实验科学,物理概念的建立和物理规律的发现都以严格的实验事实为基础,并且不断受到实验的检验。物理学在自然科学其它领域、各高新技术领域的广泛应用也离不开实验。物理实验是对高等学校学生进行科学实验基本训练的一门独立的必修基础课程,它不仅可以加深对物理理论的理解,更重要的是使学生获得基本的实验知识,在实验方法和实验技能等方面受到较系统而严格的训练。同时,在培养科学工作者的良好素质及科学世界观方面,物理实验也起着潜移默化的作用。因此,学好物理实验对于高校理工科学生是十分重要的。

一、物理实验课的目的

1. 通过对物理实验现象的观察、分析和对物理量的测量,加深对基本物理概念和基本物理定律的认识和理解。
2. 培养和提高学生的科学实验能力。这些能力是指:通过阅读教材或资料,能概括出实验原理和方法的要点;正确使用基本实验仪器,掌握基本物理量的测量方法和各种测量技术;正确记录和处理数据,判断和分析实验结果,撰写合格的实验报告,以及完成简单的具有设计性内容的实验等。
3. 培养学生理论联系实际和实事求是的科学态度,严谨踏实的工作作风,勇于探索、坚忍不拔的钻研精神以及遵守纪律、团结协作、爱护公物的优良品德。

二、物理实验课的基本程序

物理实验是学生在教师指导下独立进行实验的一种实践活动,无论实验内容的要求或研究的对象如何不同,无论采用什么方法,其基本程序大致相同,一般都有三个环节:

1. 课前预习

课前认真阅读教材中有关内容(必要时还需查阅有关参考资料),在理解本次实验的目的、原理的基础上,弄清楚要观察哪些现象,测量哪些物理量;要明确哪些物理量是间接测量量,哪些是直接测量量;用什么方法和仪器来测定,在此基础上写出预习报告。预习报告包括:画出实验原理图,列出实验所依据的理论公式,画出数据记录表格。有些实验还要求学生课前自拟实验方案,自己设计线路图或光路图,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。

2. 课堂实习

课堂实习是实验课的重要环节,学生进入实验室后应按下列要求进行实验。

- (1) 认真听取教师对本实验的要求、重点、难点和注意事项的讲解;对照仪器,仔细阅读有关仪器的使用说明和操作注意事项;进一步明确本实验的具体要求。

(2) 仪器(或实验装置)的调节。在力学、热学实验中,一些仪器使用前往往需要调至水平或垂直状态,如自由落体仪需调垂直,气垫导轨需调水平等。要注意测量仪器的零点,若某些仪器不能调零,则要记录仪器的零点值。电磁学实验中,在连接电路前,应考虑仪器设备的合理摆放,电路连接好后,还要注意把仪器调节到“安全待测状态”,然后请教师检查,确定电路连接正确无误后方可接通电源进行实验。光学实验的仪器调节尤显重要,它决定了实验能否顺利进行和测量结果是否精确可靠,一定要细心调节仪器至要求的工作状态(如分光计的调节等)。

(3) 观测。实验中必须仔细观察、积极思维、认真操作、防止急躁。要在实验所具备的客观条件(如温度、压力、仪器精度等)下,进行认真的实事求是的观察和测量。要初步学会分析实验,遇到问题时应冷静地分析和处理;仪器发生故障时,也要在教师指导下学习排除故障的方法;在实验中有意识地培养自己的独立工作能力。

(4) 记录。实验记录是计算结果和分析问题的依据,在实际工作中则是宝贵的资料。要把实验数据细心地记录在预习报告的数据表格内。记录时要用钢笔或圆珠笔,不要用铅笔。如确系记错了,也不要涂改,应轻轻画上一道,在旁边写上正确值,使正误数据都能清晰可辨,以供在分析测量结果和误差时参考。切勿先将数据记在草稿纸上,然后再誊写在表格内,这是一种不科学的习惯。此外,还应记录环境温度、湿度、气压等实验条件,仪器型号规格与编号,以及实验现象等。

总之,在课堂实习中希望同学们不要只会按照教材的实验步骤被动地去做,而要在弄懂原理的基础上自己思考着去做;不应片面追求快速完成数据测量,而应注重分析实验现象和所遇到的问题;应独立自主完成实习而不是依赖他人完成实习,否则,将收效甚微。

3. 课后小结

在充分分析实验现象、结果,理解实验原理的基础上写出实验报告。实验报告是实验工作的总结,是交流实验经验的材料,要求字体工整,文理通顺,图表规矩,结论明确,逐步培养以书面形式分析总结科学实验结果的能力。

实验报告内容包括:

(1) 实验名称、实验者姓名、实验日期。

(2) 实验目的。

(3) 实验原理。用自己的语言对实验所依据的理论做简要叙述,不要照抄书本,并附有必要的公式和原理图(包括电路图或光路图)。

(4) 实验内容。概括地、条理分明地说明实验所进行的主要程序,观察了哪些物理现象,测量了哪些物理量,并说明这些观测中所采用的方法。

(5) 数据记录与处理。将原始记录数据转记于报告上(原始记录也应附在报告上,以便教师检查),该列表的要列表,该作图的要作图。计算按照有效数字的运算法则进行,并求出结果的不确定度,正确运用不确定度表示实验结果。

(6) 结果及讨论。该部分要明确给出实验结果,并对结果进行讨论(如实验中观察到的现象分析、误差来源分析、实验中存在的问题讨论、回答实验思考题等)。也可对实验本身的设计思想、实验仪器的改进等提出建设性意见。

三、学生实验制度

为了培养学生良好的实验素质和严谨的科学态度,保证实验顺利进行和进一步提高教

学质量,特制定以下实验制度:

1. 凡参加物理实验的学生,实验前必须认真预习,写出预习报告,经教师检查同意后方可进行实验。
2. 上课时不准迟到,不准无故缺课。无正当理由迟到 15 分钟者实验要扣分;超过半小时者教师有权取消其本次实验资格;无故缺席者本次实验记零分。
3. 必须严格按照实验要求和仪器操作规程,积极认真地进行实验,并做好相关实验记录。
4. 爱护仪器设备。不得随意从他组乱拉仪器,不准擅自拆卸仪器;仪器发生故障应立即报告,不得自行处理;仪器如有损坏,照章赔偿。
5. 室内严禁吸烟、吐痰和大声喧哗。
6. 做完实验,学生应将仪器整理还原,将桌面和凳子收拾整齐,经教师审查测量数据并签字后,方可离开实验室。
7. 实验报告应在实验后一周内交实验室。

第一章 测量误差、不确定度及数据处理的基础知识

物理实验离不开物理量的测量,由于测量仪器、测量方法、测量条件、测量人员等因素的限制,对一物理量的测量不可能是无限精确的,即测量中的误差是不可避免的。没有测量误差的基本知识,就不可能获得正确的测量值;不会计算测量结果的不确定度就不能正确表达和评价测量结果;不会处理数据或处理数据方法不当,就得不到正确的实验结果。由此可见,测量误差、不确定度与数据处理的基本知识在整个实验中占有非常重要的地位。本章从实验教学的角度出发,主要介绍误差和不确定度的基本概念、测量结果不确定度的计算、实验数据处理和实验结果表达等方面的基本知识。这些知识不仅在每个物理实验中要用到,而且对于今后从事科学实验也是必须了解和掌握的。由于这部分内容涉及面较广,深入的讨论需要有丰富的实践经验和较多的数学知识,因此不能指望通过一两次学习就完全掌握。我们要求实验者首先对提到的问题有一初步的了解,以后结合每一个具体实验再仔细阅读有关内容,通过实际运用逐步加以掌握。

误差分析、不确定度计算以及数据处理贯穿于实验的全过程,它表现在实验前的实验设计与论证,实验进行过程中的控制与监视,实验结束后的数据处理和结果分析。通过本章的学习和今后各个实验中的运用,要求达到:

- (1) 建立误差和不确定度的概念,正确估算不确定度,懂得如何正确完整地表示实验测量结果。
- (2) 掌握有效数字的概念及运算规则,了解有效数字与不确定度的关系。
- (3) 了解系统误差对测量结果的影响,学习发现某些系统误差、减小系统误差及削弱其影响的方法。
- (4) 掌握列表法、作图法、逐差法和回归法等常用的数据处理方法。

§ 1-1 测量误差的基本知识

1-1-1 测量与误差

物理实验是将自然界物质运动中的物理形态按人们的意愿在实验中再现,找出各物理

量之间的关系,确定它们的数值大小,从中获得规律性的认识,或验证理论,或发现规律,或作为实际应用的依据。要得到这种定量化的认识,就必须进行测量。为确定被测对象的测量值,首先必须选定一个单位,然后用这个单位与被测对象进行比较,求出它对该单位的比值,这个比值即为数值。显然,数值的大小与所选用的单位有关。因此,表示一个被测对象的测量值时必须包括数值和单位。

1. 直接测量和间接测量

可以用测量仪器或仪表直接读出测量值的测量称为**直接测量**,相应的物理量称为直接测量量。例如用米尺测长度,用天平称质量,用电表测电流和电压等都是直接测量。

在实际测量中,许多物理量没有直接测量的仪器,往往需要根据某些原理得出函数关系式,由直接测量量通过数学运算才能获得测量结果。这种测量称为**间接测量**,相应的物理量称为间接测量量。例如用单摆测某地重力加速度 g ,先直接测得摆长 l 和单摆周期 T ,然后由公式 $T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$ 算出重力加速度,因此 g 为间接测量量。

2. 等精度测量和不等精度测量

如对某一物理量进行多次重复测量,而且每次测量的条件都相同(同一测量者,同一组仪器,同一种实验方法,温度和湿度等环境也相同),那么我们就没有任何依据可以判断某一次测量一定比另一次更准确,所以每次测量的精度只能认为是具有同等级别的。我们把这样进行的重复测量称为**等精度测量**。在诸测量条件中,只要有一个发生了变化,这时所进行的测量,就称为**不等精度测量**。一般在进行多次重复测量时,要尽量保持为等精度测量。

3. 测量误差

在一定条件下,任何一个物理量的大小都是客观存在的,都有一个实实在在、不依人的意志为转移的客观量值,称为**真值**。在测量过程中,我们总希望准确地测得待测量的真值。但是,任何测量总是依据一定的理论和方法,使用一定的仪器,在一定的环境中,由一定的人员进行的。由于实验理论的近似性,实验仪器的灵敏度和分辨能力的局限性,实验环境的不稳定性和人的实验技能和判断能力的影响等,使测量值与待测量的真值之间总存在着差异,我们把这种差异称为**测量误差**。若某物理量的测量值为 x ,真值为 A ,则测量误差定义为:

$$\epsilon = x - A \quad (1-1-1)$$

上式所定义的测量误差反映了测量值偏离真值的大小和方向,因此又称 ϵ 为绝对误差。一般来说,真值仅是一个理想的概念,只有通过完善的测量才能获得。但是,严格的完善测量难以做到,故真值就不能确定。实际测量中,一般只能根据测量值确定测量的最佳值。通常取多次重复测量的平均值作为最佳值。

绝对误差可以表示某一测量结果的优劣,但在比较不同测量结果时则不适用,需要用相对误差表示。例如,测量 10 m 长相差 1 mm 与测量 1 m 长相差 1 mm,两者绝对误差相同,而相对误差不同。相对误差定义为

$$\text{相对误差} = \frac{\text{绝对误差}}{\text{测量最佳值}} \times 100\% \quad (1-1-2)$$

有时被测量有公认值或理论值,还可用“百分误差”来表征:

$$\text{百分误差} = \frac{\text{测量最佳值} - \text{公认值}}{\text{公认值}} \times 100\% \quad (1-1-3)$$

误差存在于一切科学实验和测量过程的始终。在实验的设计、仪器本身的精度、环境条件以及实验数据处理中都可能存在误差,因此分析测量中可能产生的各种误差,尽可能消除其影响,并对最后结果中未能消除的误差作出估计,就是物理实验和许多科学实验中不可缺少的工作。为此,必须进一步研究误差的性质和来源。

1-1-2 误差的分类

误差按其性质和产生原因可分为系统误差、随机误差和粗大误差三类。

一、系统误差

在一定条件下,对同一物理量进行多次重复测量时,误差的大小和符号均保持不变;而当条件改变时,误差按某种确定的规律变化(如递增、递减、周期性变化等),则这类误差称为系统误差。

1. 系统误差的来源

(1) 仪器的结构和标准不完善或使用不当引起的误差。如天平不等臂、分光计读数装置的偏心差、电表的示值与实际值不符等属于仪器缺陷,在使用时可采用适当测量方法加以消除。仪器设备安装调整不妥,不满足规定的状态,如不水平、不垂直、偏心、零点不准等使用不当的情况应尽量避免。

(2) 理论或方法误差。它是由测量所依据的理论公式近似或实验条件达不到理论公式所规定的要求等引起的。如单摆测重力加速度时所用公式的近似性;伏安法测电阻时,不考虑电表内阻的影响等。

(3) 环境误差。它是由于外部环境如温度、湿度、光照等与仪器要求的环境条件不一致而引起的误差。

(4) 实验人员的生理或心理特点所造成的误差。如用停表计时时,总是超前或滞后;对仪表读数时总是偏一方斜视等。

2. 系统误差按其掌握程度可分为已定系统误差和未定系统误差

(1) 已定系统误差 在一定的条件下,采用一定的方法,对误差取值的变化规律及其大小和符号都能确切掌握的系统误差。一经发现,在测量结果中可以修正,如千分尺的零点修正。

(2) 未定系统误差 指不能确切掌握误差取值的变化规律及其大小和符号,而仅知最大误差范围(或极限误差)的系统误差。例如仪表的基本允许误差主要属于未定系统误差。

3. 系统误差按其表现的规律可分为定值系统误差和变值系统误差

(1) 定值系统误差 这种误差在测量过程中其大小和符号恒定不变。例如,千分尺没有零点修正,天平砝码的标称值不准确等。

(2) 变值系统误差 这种误差在测量过程中呈现规律性变化。这种变化,有的可能随时间而变,有的可能随位置变化。例如分光计刻度盘中心与望远镜转轴中心不重合,存在偏心差所造成的读数误差就是一种周期性变化的系统误差。

系统误差产生的原因往往可知或能掌握,一经查明就应设法消除其影响。对未能消除的系统误差,若它的符号和大小是确定的,则可对测量值加以修正;若它的符号和大小都是不确定的,则可设法减小其影响并估计出误差范围。

二、随机误差

在测量过程中,即使系统误差消除以后,在相同条件下重复测量同一物理量时,仍然不会得到完全相同的结果,其测量值分散在一定的范围内,所得误差时正时负,绝对值时大时小,既不能预测,也无法控制,呈现无规则的起伏。这类误差称为随机误差。

随机误差的产生,一方面是由测量过程中一些随机的未能控制的可变因素或不确定的因素引起的。如人的感官灵敏度以及仪器精密度的限制,使平衡点确定不准或估读数有起伏;由于周围环境干扰而导致读数的微小变化,以及随测量而来的其它不可预测的随机因素的影响等。另一方面是由被测对象本身的不稳定性引起的。如加工零件或被测样品本身存在的微小差异,这时被测量就没有明确的定义值,这也是引起随机误差的一个原因。

随机误差就个体而言是不确定的,但其总体(大量个体的总和)服从一定的统计规律,因此可以用统计方法估算其对测量结果的影响。

三、粗大误差

明显地歪曲了测量结果的误差称为粗大误差。它是由于实验者使用仪器的方法不正确,粗心大意读错、记错、算错测量数据或实验条件突变等原因造成的。含有粗大误差的测量值称为坏值或异常值,正确的结果中不应包含有过失错误。在实验测量中要极力避免过失错误,在数据处理中要尽量剔除坏值。

1-1-3 随机误差的分布规律与特性

随机误差的出现,就某一测量值来说是没有规律的,其大小和方向都是不能预知的,但对同一物理量进行多次重复测量时,则发现随机误差的出现服从某种统计规律。

随机误差的分布有多种,不同的分布有不同形式的分布函数,但无论哪一种分布形式,一般都有两个重要的参数,即平均值和标准偏差。

1. 正态分布规律

理论和实践都证明,大多数随机误差服从正态分布(高斯分布)规律。下面简要讨论正态分布的特点及特性参量。

标准化的正态分布曲线如图 1-1-1 所示。图中横坐标 x 表示某一物理量的测量值,纵坐标表示测量值的概率密度 $f(x)$:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-(x-m)^2/2\sigma^2}$$

$$\text{式中: } m = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n},$$

m 称为总体平均值;

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

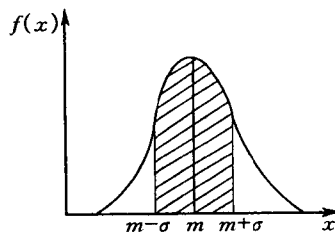


图 1-1-1 正态分布曲线

σ 称为正态分布的标准偏差,是表征测量分散性的一个重要参量。

从曲线上看,曲线峰值处的横坐标相应于测量次数 $n \rightarrow \infty$ 时的测量平均值,即总体平均值 m ,横坐标上任一点 x_i 到 m 的距离 $(x_i - m)$ 即为测量值 x_i 的随机误差分量。标准偏差 σ 为曲线上拐点处的横坐标与 m 值之差。这条曲线是概率密度分布曲线。曲线与 x 轴间的面积为 1,可以用来表示随机误差在一定范围内的概率。如图中阴影部分的面积就是随机误差在 $\pm \sigma$ 范围内的概率,即测量值落在 $(m - \sigma, m + \sigma)$ 区间内的概率 p_0 由定积分计算得出,其值为 $P = 68.3\%$ 。如将区间扩大到 2 倍,则 x 落在 $(m - 2\sigma, m + 2\sigma)$ 区间中的概率为 95.4% ; x 落在 $(m - 3\sigma, m + 3\sigma)$ 区间中的概率为 99.7% 。

服从正态分布的随机误差有如下特征:

- (1) 单峰性 绝对值小的误差比绝对值大的误差出现的概率大。
- (2) 对称性 绝对值相等的正误差和负误差出现的几率相等。
- (3) 有界性 绝对值很大的误差出现的概率近于零。
- (4) 抵偿性 随机误差的算术平均值随着测量次数的增加而趋近于零。

2. 残差、偏差和误差

图 1-1-2 随机误差分布曲线中, x_0 是被测量的真值, m 是总体平均值, $\bar{x}$ 是有限次测量的平均值, x_i 是单次测得值。

残差: 单次测得值 x_i 与测量平均值 $\bar{x}$ 之差。即

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

偏差: 单次测得值 x_i 与总体平均值 m 之差, 偏差就是随机误差(分量)。当系统误差为零时, 偏差才是误差。

误差: 单次测得值 x_i 与被测量真值 x_0 之差。

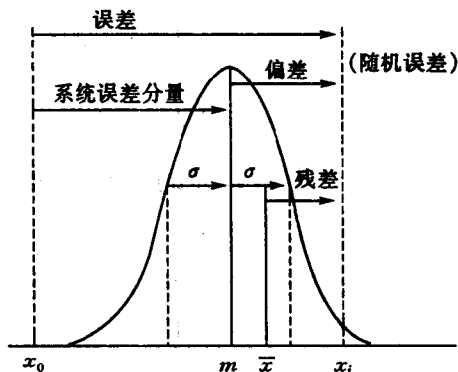


图 1-1-2 随机误差分布曲线

3. σ 、 S 和 $S_{\bar{x}}$

(1) 总体标准偏差 σ

不考虑系统误差分量时, σ 称为标准误差。 σ 不是测量值中任何一个具体测量值的随机误差。 σ 的大小只说明在一定条件下等精度测量列随机误差的概率分布情况。在该条件下, 任一单次测量值的随机误差, 一般都不等于 σ , 但却认为这一系列测量中所有测量值都属于同一个标准偏差 σ 的概率分布。在不同条件下, 对同一被测量量进行两个系列的等精度测量, 其标准偏差 σ 也不相同。我们已经知道:

$$\sigma = \lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - m)^2}{n}} \quad (1-1-4)$$

m 为 $n \rightarrow \infty$ 时的总体平均值。不考虑系统误差分量时, 它就是真值。由于实验中不可能出现 $n \rightarrow \infty$, 故 m 是一个理想值, 因此 σ 也是一个理论值。所谓置信概率 p 为 68.3% 也是一个理论值。

(2) 有限次测量时, 单次测得值的标准差 S (或 S_x)

由于实验中测量次数总是有限的, 在大学物理实验中, 通常取 $5 \leq n \leq 10$, 因此我们实际应用的都是这种情况下的单次测得值的标准偏差公式, 即贝塞尔公式:

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

S 是从有限次测量中计算出来的总体标准偏差 σ 的最佳估计值, 称为实验标准偏差。它表征对同一被测量作 n 次有限测量时, 其结果的分散程度。其相应的置信概率接近于 68.3%, 但不等于 68.3%。

(3) 算术平均值 $\bar{x}$ 的标准偏差 $S_{\bar{x}}$

如果在相同条件下, 对同一量作多组重复的系列测量, 则每一系列测量都有一个算术平均值。由于随机误差的存在, 两个测量列的算术平均值也不相同。它们围绕着被测量量的真值 (设系统误差分量为零) 有一定的分散。此分散说明了算术平均值的不可靠性, 而算术平均值的标准偏差 $S_{\bar{x}}$ 则是表征同一被测量的各个测量列算术平均值分散性的参数, 可作为算术平均值不可靠性的评定标准。 $S_{\bar{x}}$ 又称算术平均值的实验标准差。可以证明:

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

我们可以这样来理解它: 由于算术平均值已经对单次测量的随机误差有一定的抵消, 因而这些平均值就更接近真值, 它们的随机误差分布离散就会小得多, 所以平均值的标准偏差要比单次测量值的标准偏差小得多。

1-1-4 系统误差的处理

在许多情况下, 系统误差常常不明显地表现出来, 然而它却是影响测量结果精确度的主要因素, 有些系统误差会给实验结果带来严重影响。因此, 发现系统误差, 设法修正、减小或消除它的影响, 是误差分析的一个很重要的内容。由于系统误差的处理涉及较深的知识, 这里只做简要介绍。

1. 发现系统误差的方法

(1) 数据分析法 当随机误差比较小时, 将待测量的绝对误差按测量次序排列, 观察其变化。若绝对误差不是随机变化而呈规律性变化, 如线性增大或减小、周期性变化等, 则测量中一定存在系统误差。

(2) 理论分析法 分析实验依据的理论公式所要求的条件在实验测量过程中是否得到满足。例如气垫导轨实验中, 滑块在导轨上的运动因受到周围空气及气垫层的粘滞性摩擦阻力的作用会引起速度减小。如果实验中作为无摩擦的理想情况来处理, 就会产生与摩擦力有关的系统误差。

分析仪器要求的使用条件是否得到满足。实验不满足仪器的使用条件时也会产生系统误差。