

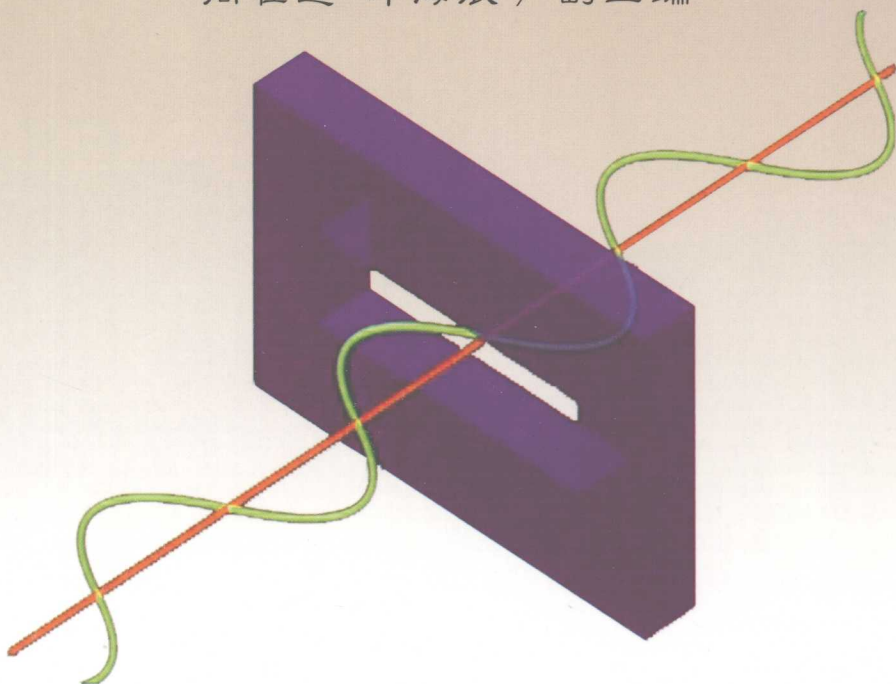
大学物理

实验教程

DAXUE WULI SHIYAN JIAOCHENG

涂寒 / 主编

周在进 印海辰 / 副主编



东南大学 出版社
SOUTHEAST UNIVERSITY PRESS

大学物理实验教程

主 编 徐 寒

副主编 周在进 印海辰

编 者 胡 光 周明秀

高春来 曹 前 肖宇飞

东南大学出版社
南 京

内容简介

本教材是根据教育部高等工科院校教材编写大纲和淮阴工学院《大学物理实验教学大纲》，为适应学校发展和人才培养模式的需要而编写的。秉承“分层次、多模块、组合式、衔接化”的教学原则，建立了较先进的实验教学内容与课程新体系。将实验教学内容分为四个层次：第一个层次——技能实验，第二个层次——基础性实验，第三个层次——提高性、综合性实验，第四个层次——设计性实验。本书涵盖力学、热学实验，电学、电磁学实验，光学实验，近代物理与信息处理综合实验等，具有较鲜明的特色。

本教材适用于高等工科院校理、工科各专业的物理实验课程的教学，也可供工程技术、实验人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

大学物理实验教程/徐寒主编.—南京:东南大学出版社,2009.4

ISBN 978-7-5641-1606-4

I. 大… II. 徐… III. 物理学-实验-高等学校-教材
IV. O4-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 045342 号

东南大学出版社出版发行

(南京四牌楼 2 号 邮编 210096)

出版人:江汉

各地新华书店经销 大丰市科星印刷有限责任公司印刷

开本:787mm×1092mm 1/16 印张:16 字数:399千字

2009年4月第1版 2009年4月第1次印刷

ISBN 978-7-5641-1606-4

印数:1~5800册 定价:20.00元

(凡因印装质量问题,可与东大出版社读者服务部联系。电话:025-83792328)

前 言

本教材是根据教育部高等工科院校教材编写大纲和淮阴工学院《大学物理实验教学大纲》，为适应学校发展和人才培养模式的需要，在总结物理实验教学改革的基础上，汲取了当前国内外优秀实验教学成果编写而成的。本教材秉承“分层次、多模块、组合式、衔接化”的教学原则，建立了较先进的实验教学内容与课程新体系。将实验教学内容分为四个层次：第一个层次——技能实验，第二个层次——基础性实验，第三个层次——提高性、综合性实验，第四个层次——设计性实验。本书涵盖力学、热学实验，电学、电磁学实验，光学实验，近代物理与信息处理综合实验等，具有较鲜明的特色。与传统的工科物理实验教材相比，本教材力求完整、系统地反映当前主流的实验理论、技术和方法；注重实验教学内容与课程新体系的分层次、多模块相结合；增添了许多新的实验内容。例如，对误差理论与数据处理基础知识的介绍具有系统性、完整性；教材以力、热、声、电、光及近代物理实验、计算机在物理问题中的应用等内容为基础，较多地选编、增设了设计性与综合性实验，以便学生自主设计性学习与创新训练。在许多传统的实验中，也使用了新的实验仪器、新的实验技术，并介绍推荐利用计算机进行数据处理。为了帮助学生写好实验报告，教材中还给出了实验数据记录和参考表格。

本教材由大学物理教学实验中心的徐寒老师担任主编，周在进、印海辰两位老师担任副主编，参与本书编写的老师有胡光、周明秀、高春来、曹前、肖宇飞等，由徐寒老师统稿审校。本教材在编写过程中参考了许多院校同行编写的相关书籍和资料，在此一并表示感谢。限于编者水平，教材中难免存在错漏和不足之处，恳请读者批评指正。

编者于淮阴工学院

2008年10月

物理实验室规则

1. 进入实验室之前,必须先预习实验,写好预习报告,经老师检查同意后方可进行实验。

2. 遵守实验纪律,不得迟到,不准无故缺课,不得随意下位、串组。不得大声喧哗、抽烟和吃东西,以保持实验室的安静和卫生。

3. 爱护仪器,进入实验室后不能擅自盲目摸弄仪器,实验中严格按操作规程操作,如有损坏,照章赔偿。公用工具用完后立即归还原处。

4. 如遇到自己不能处理的问题,应及时报告教师。电学实验电路连接好后,务必经教师检查后方可接通电源。

5. 实验结束后,学生应将仪器整理还原,将桌面和凳子收拾整齐。在规定时间内完成实验报告后交由教师签字或批改后方可离开实验室。

6. 在实验时,应携带必需的工具,如计算器、直尺、铅笔、橡皮等。

目 录

129	.....	二十餘页
141	.....	三十餘页
151	.....	四十餘页
158	.....	五十餘页
163	.....	六十餘页
168	.....	七十餘页
171	.....	八十餘页
第一部分 绪论 1		
第一节	大学物理实验课程的基本定位.....	1
第二节	大学物理实验课程的基本要求及程序.....	1
第三节	常用物理实验方法.....	6
第二部分 数据处理基础知识 10		
第一节	测量误差及不确定度分析.....	10
第二节	有效数字及测量结果有效位数的保留.....	14
第三节	常用数据处理方法.....	19
第三部分 技能实验 26		
实验一	物体密度的测定.....	26
实验二	气垫导轨的使用.....	34
实验三	示波器的使用.....	42
实验四	惠斯登电桥.....	55
实验五	板式电位差计的使用.....	60
实验六	几何光学.....	64
实验七	显微镜的使用.....	69
实验八	分光计的调节与使用.....	73
第四部分 基础实验 80		
实验一	杨氏弹性模量的测定——拉伸法.....	80
实验二	杨氏弹性模量的测定——霍尔法.....	87
实验三	刚体转动惯量测定.....	90
实验四	弦线驻波的研究.....	95
实验五	液体表面张力系数.....	99
实验六	空气比热容比的测定.....	104
实验七	导热系数.....	109
实验八	空气热机.....	112
实验九	直流单双臂电桥.....	119
实验十	电位差计.....	124
实验十一	静电场的描绘.....	132

实验十二	霍尔效应和螺线管磁场测量	139
实验十三	声速的测量	147
实验十四	牛顿环、劈尖	152
实验十五	迈克尔逊干涉仪	158
实验十六	衍射光栅	163
实验十七	光的偏振	168
实验十八	旋光仪测糖溶液的浓度	174
第五部分 提高性实验		
实验一	全息照相	181
实验二	弗兰克-赫兹实验	185
实验三	光电效应	190
实验四	光电、声光的调制	196
实验五	液晶光电效应	204
实验六	硅光电池特性的研究	209
实验七	核磁共振	214
实验八	氢原子光谱	224
实验九	光导纤维	230
第六部分 设计性实验		
实验一	利用激光测金属丝的杨氏模量	235
实验二	薄纸厚度的测量	236
实验三	重力加速度的测量	237
实验四	不规则固体密度的测定	238
实验五	液体(蔗糖溶液)表面张力系数和浓度的关系	239
实验六	液体中的声速测量	240
实验七	非线性电阻伏安特性曲线测定	241
实验八	电表的改装和校准	242
实验九	变阻器变流和分压电路的设计	243
实验十	三棱镜对不同波长的折射率测定	244
实验十一	利用白光干涉测量玻璃片折射率	245
实验十二	液体折射率的测定	246
附表		
101		247
102		
103		
104		
105		
106		
107		
108		
109		
110		
111		
112		
113		
114		
115		
116		
117		
118		
119		
120		
121		
122		
123		
124		
125		
126		
127		
128		
129		
130		
131		
132		
133		
134		
135		
136		
137		
138		
139		
140		
141		
142		
143		
144		
145		
146		
147		
148		
149		
150		
151		
152		
153		
154		
155		
156		
157		
158		
159		
160		
161		
162		
163		
164		
165		
166		
167		
168		
169		
170		
171		
172		
173		
174		
175		
176		
177		
178		
179		
180		
181		
182		
183		
184		
185		
186		
187		
188		
189		
190		
191		
192		
193		
194		
195		
196		
197		
198		
199		
200		

物理实验课程是高等学校工科类各专业本科学生进行科学实验基本训练的一门独立的公共必修基础主干课程,是学生进入大学后系统学习实验方法和实验技能的开端,是学生进行科学实验训练的重要基础。通过本课程对物理实验知识和方法的学习,使学生得到实验技能的训练,初步了解科学实验的主要过程和基本方法,具有一定的科学实验能力,以适应科学技术不断进步和社会迅速发展的需要,并为今后的学习和工作奠定良好的实验基础。因此,学好大学物理实验课的关键,在于把握课程的基本要求和基本程序。

第一部分 绪 论

第一节 大学物理实验课程的基本定位

物理学本质上是一门实验科学。物理学在人的科学素质培养中具有重要的地位,物理实验课程曾经为培养 20 世纪的优秀人才作出了卓越的贡献,实验为物理学的基础,它反映了理工科实验的共性和普遍性问题。20 世纪中叶以来,以计算机信息科学技术、生命科学、空间科学、材料科学等为代表的新的科学技术革命,极大地加速了科学技术的发展和各学科之间的相互交叉和渗透,新的综合化趋势已成为科学发展的主流。因此,大学物理实验作为大学生进校后的第一门科学实验课程,不仅应让学生受到严格的、系统的实验技能训练,掌握科学实验的基本知识、方法和技巧,更主要的是要培养学生严谨的科学思维能力和创新精神,培养学生理论联系实际、分析和解决实际问题的能力,特别是与科学技术的发展相适应的综合能力。

大学物理实验作为一门独立的基础课程,有以下几个方面的地位、作用和任务:

1. 使学生通过对实验现象的观察、分析和对物理量的测量,学习物理实验知识,加深对物理原理的了解。

2. 培养和提高学生的科学实验能力,其中包括:

(1) 能够通过阅读实验教材或资料,作好实验前的准备;

(2) 能够借助教材和仪器说明书,正确使用常用仪器;

(3) 能够运用物理学理论对实验现象进行分析判断;

(4) 能够正确记录和处理实验数据,正确绘制实验图线,分析实验结果,总结实验规律,撰写合格的实验报告;

(5) 能够独立完成教学性的设计实验。

3. 培养和提高学生的科学实验素质,使学生具有理论联系实际和实事求是的科学作风、严肃认真的工作态度、主动研究的探索精神,遵守纪律、团结协作和爱护公共财物的优良品德。

第二节 大学物理实验课程的基本要求及程序

大学物理实验课程是高等学校工科类各专业本科学生进行科学实验基本训练的一门独立的公共必修基础主干课程,是学生进入大学后系统学习实验方法和实验技能的开端,是学生进行科学实验训练的重要基础。通过本课程对物理实验知识和方法的学习,使学生得到实验技能的训练,初步了解科学实验的主要过程和基本方法,具有一定的科学实验能力,以适应科学技术不断进步和社会迅速发展的需要,并为今后的学习和工作奠定良好的实验基础。因此,学好大学物理实验课的关键,在于把握课程的基本要求和基本程序。

一、基本要求

1. 在学习中要适当地注意一些物理实验史和物理实验在工程技术中的应用,从而更好地接受辩证唯物主义世界观和方法论的教育,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. 在整个物理实验过程中,要养成良好的实验习惯,爱护公共财物,遵守安全制度,树立优良作风。

3. 了解评定测定结果可靠性的基本知识和基本方法(如标准差或不确定度),具有正确处理实验数据的初步能力。

4. 通过物理实验的基本训练,必须做到:

(1) 自行完成预习、独立思考、认真进行实验操作和撰写实验报告等主要实验程序。

(2) 能够正确调整常用实验装置,并掌握基本操作技术。

(3) 了解物理实验中常用的实验方法和测量方法,能够进行常用物理量的一般测量,了解常用仪器的性能,并掌握实验方法。

在进行以上各项基本训练的过程中,要重视对物理实验现象的观察和分析;要学会运用理论进行指导实践,解决实验中的问题。

(4) 通过一定数量的近代物理实验、应用性和综合性实验,理解近代物理概念,了解物理实验技术的应用,提高进行综合实验的能力。

(5) 通过一定量的设计性实验,在实验方法的考虑、测量仪器的选择和配置、测量条件的确定等方面受到初步训练。在可能条件下,适当利用微机进行模拟、仿真和实时数据采集的实验。

二、基本物理实验技能

(一) 基本物理实验方法

常用的基本物理实验方法有:比较法;补偿法;放大法;归纳法;转换测量法;模拟法等。

(二) 常用实验数据处理法

常用的实验数据处理法有:图示与图解法;列表法;逐差法;有效数字与误差(不确定度)运算法;简单线性函数的最小二乘法等。

(三) 基本物理量的测量

物理实验中需要测量的基本物理量有:长度(角度);质量;时间;温度;电流强度;电压;电阻;电动势;磁感应强度;波长;周期;频率;焦距;速度;加速度;转动惯量;折射率;电阻温度系数;弹性系数;表面张力系数;杨氏模量;光栅常数;曲率半径等。

(四) 常用仪器的使用

物理实验中必须学会使用常用的仪器,主要有:米尺;游标卡尺(直、圆);数显卡尺;螺旋测微器;物理天平;电子天平;焦力氏秤;秒表;温度计;数字温度计;数字毫秒计;交、直流电流表;交、直流电压表;灵敏电流计;冲击电流计;检流计;万用电表;数字万用表;通用示波器;读出示波器;存储示波器;函数信号发生器;晶体管毫伏表;交、直流电桥;电位差计;直流稳压、稳流源;滑线变阻器;电阻箱;可变标准电感、电容;标准互感器;各种开关;函数记录仪;微电流测量放大仪;声速测定仪;密立根油滴仪;光电效应测量仪;磁滞回线仪;静电场描绘仪;旋光仪;转动惯量测定仪;电容电桥;望远镜;读数显微镜;分光

计;光源;光具座;迈克尔逊干涉仪;透镜;反射镜;椭圆偏振仪;棱镜摄谱仪;Na、Hg、H灯;He-Ne激光器。

三、基本教学程序

物理实验主要是依据物理思想操作仪器和设备,进行物理量的测量,观测研究物理现象(效应)、仪器特性和物理量的变化规律。在物理实验教学过程中,学生要在教师指导下独立进行仪器操作,观测、记录、处理数据,分析实验结果。因此,大学物理实验教学程序一般分为3个阶段:

1. 课前预习

实验前学生必须预习有关实验教材和仪器使用说明等参考资料,明确实验目的,弄懂实验原理和实验方法,了解有关测量仪器设备的性能和操作技术,熟记有关注意事项。在此基础上撰写实验预习报告。实验预习报告包括:

- (1) 实验名称、目的;
- (2) 实验仪器、设备(注意型号和精度);
- (3) 简要实验原理、计算公式、电路图、光路图,实验误差要求;
- (4) 实验记录表格(根据实验内容步骤拟定)。必须强调说明,设计合理、完整的测量记录表格是做好实验的一项重要的准备工作。

2. 实验过程(调整实验装置,进行测量记录)

操作和测量是实验教学的主要环节。实验前指导教师简要讲授实验的操作和测量方法。学生开始进行实验时应先检查仪器设备,并进行简单练习操作,待基本熟悉仪器性能及使用方法后才开始进行实验测量。在实验过程中,学生要严肃认真,仔细观察物理现象,正确读取和记录测量数据。要学会分析和排除实验故障,若发现问题而无法解决时,应及时向教师(或管理人员)报告,由教师协助处理。仪器设备调整、操作、测量、记录是科学实验的基本功。实验记录内容一般应包括:

- (1) 实验条件有关的物理量(如室温、气压、相对湿度等);
- (2) 仪器设备型号、精度等级、允许误差及量程等;
- (3) 每次测读到的物理量数值、有效数字和单位等原始测量数据,应立即如实地记录在表格上。若发现记录数据有问题,可以删除或再测量,但切不可抄袭或涂改数据。

实验完毕后,将记录数据交教师审查签名,最后应整理实验仪器。

3. 做好实验报告

实验结束后,应根据实验要求及时正确处理所记录的数据,并写出完整的实验报告,并于实验完成后一周内交至实验报告投递箱。实验报告要用统一印制的实验报告纸书写,其格式和内容如下:

- (1) 实验名称、目的和要求。
- (2) 实验原理:简要叙述实验原理、计算公式、实验电路图及光路图。
- (3) 仪器设备:注明型号和精度等级。
- (4) 实验内容和步骤:简要写出实验内容、步骤及实验注意事项。
- (5) 实验数据记录:测量数据一般采用表格形式进行记录,记录的数据应对确定的系统误差作出修正。
- (6) 数据处理:按照实验要求计算测量结果,绘制实验图线,用标准差(或不确定度)评

估测量结果的可靠性。

(7) 报告实验结果和分析测量误差。

(8) 课后小结: 写出自己的感想、体会或建议(实验仪器、实验方法和实验过程设计思想的改进等)。

(9) 问题讨论: 一般以实验后的思考题为准。

实验报告要求书写字迹清楚, 层次分明, 文句通顺, 数据齐全, 作图规范, 纸面整洁。

附: 实验报告范例

实验名称: 衍射光栅

实验日期: 2008. 10. 20 实验时间: 14 时 00 分

系别: 计算机工程系 班级: 通信 1072 姓名: 陈万宏 学号: 1071302206

一、实验目的

1. 观察光的衍射现象;
2. 测定光栅常数 d 和光波波长;
3. 进一步熟悉分光计的使用。

二、实验仪器

表 1

设备名称	型号、精度	数量	设备编号
分光计	JJY1	1	20000526
汞灯	GP20Hg, $\lambda_{\text{绿}} = 546.07 \text{ nm}$	1	2000522B
光栅	300 条 / mm	1	

三、实验原理

当平行光垂直入射光栅时, 满足光栅衍射明纹条件的光栅方程为:

$$d \sin \varphi = k \lambda \quad (k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots)$$

其中, d 是光栅常数, φ 是衍射角, k 是衍射级次, 如图 1 所示。

由上式, 如果已知波长 λ 和衍射级次 k , 就可根据测得的衍射角 φ 求出光栅常数 d ; 如果已知光栅常数 d 和衍射级次 k , 则可根据测得的衍射角 φ 求出相应光谱线的波长 λ 。

为了保证平行光入射与出射, 并减小测量误差, 在测量前必须先对分光计进行调节。调节的标准为: 平行光管能够发出平行光; 望远镜能够接收平行光; 平行光管光轴、望远镜光轴都要与仪器的旋转主轴相垂直。

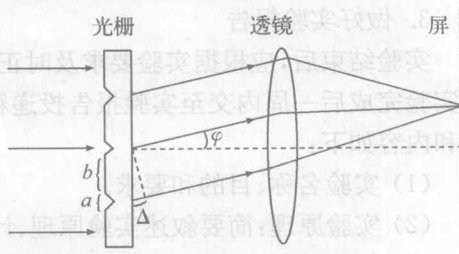


图 1 光栅衍射光路图

四、实验步骤

1. 调节分光计。使之达到标准状态，即平行光管能够发出平行光；望远镜能够接收平行光；平行光管光轴、望远镜光轴与仪器的旋转主轴相垂直。
2. 将光栅放置在载物平台上，并注意让它与平行光管垂直；使光栅条纹垂直于旋转主轴。
3. 测出绿谱线($\lambda_{\text{绿}} = 546.07 \text{ nm}$) ± 1 级和 ± 2 级的衍射角。由光栅公式求出光栅常数 d 。
4. 测出紫谱线 ± 1 级和 ± 2 级的衍射角，根据测得的光栅常数 d 和光栅公式，求出紫色谱线的波长 $\lambda_{\text{紫}}$ 。

五、实验数据

表2 测定光栅常数 d

亮纹级数	读数			衍射角		$\sin \bar{\varphi}_k$	$\lambda \text{ (nm)}$	$d \text{ (nm)}$	$\bar{d} \text{ (nm)}$
	θ	θ'	平均	φ_k	$\bar{\varphi}_k$				
$k = 0$	$50^\circ 18'$	$230^\circ 17'$	$140^\circ 18'$						
$k = +1$	$30^\circ 5'$	$210^\circ 5'$	$120^\circ 5'$	$20^\circ 13'$	$19^\circ 14'$	0.329 4	546.07	1.658×10^3	1.658×10^3
$k = -1$	$68^\circ 32'$	$248^\circ 32'$	$158^\circ 32'$	$18^\circ 14'$					
$k = +2$	$6^\circ 18'$	$186^\circ 18'$	$96^\circ 18'$	$44^\circ 0'$	$41^\circ 13'$	0.658 9	546.07	1.658×10^3	1.658×10^3
$k = -2$	$88^\circ 45'$	$268^\circ 46'$	$178^\circ 46'$	$38^\circ 26'$					

表3 测定光波波长

亮纹级数	读数			衍射角		$\sin \bar{\varphi}_k$	$d \text{ (nm)}$	$\lambda \text{ (nm)}$	$\bar{\lambda} \text{ (nm)}$
	θ	θ'	平均	φ_k	$\bar{\varphi}_k$				
$k = 0$	$50^\circ 18'$	$230^\circ 17'$	$140^\circ 18'$						
$k = +1$	$34^\circ 23'$	$214^\circ 21'$	$124^\circ 22'$	$15^\circ 56'$	$15^\circ 13'$	0.262 4	1.658×10^3	435.0	435.6
$k = -1$	$64^\circ 47'$	$244^\circ 48'$	$154^\circ 48'$	$14^\circ 30'$					
$k = +2$	$16^\circ 52'$	$196^\circ 54'$	$106^\circ 53'$	$33^\circ 25'$	$31^\circ 45'$	0.526 2	1.658×10^3	436.2	435.6
$k = -2$	$80^\circ 23'$	$260^\circ 22'$	$170^\circ 23'$	$30^\circ 5'$					

计算对于标准值的相对误差：

$$\lambda_0 = 435.8 \text{ nm}, E = \frac{|\bar{\lambda} - \lambda_0|}{\lambda_0} \times 100\% = \frac{|435.6 - 435.8|}{435.8} \times 100\% \approx 0.05\%$$

误差分析：

1. 仪器系统误差。
2. 调节分光计时判断不准确造成的误差。
3. 测量谱线位置读数时，谱线有一定宽度，中央位置的确定受到实验者判断的主观影响，引入误差。
4. 光栅平面与入射光不是绝对垂直引入误差。

实验感想:

衍射光栅实验是一个研究光栅衍射的光学实验,实验前我选做了技能实验——分光计的调节。尽管课前做了充分的思想准备和预习,但在实验的开始几分钟我还是被分光计上的诸多调节旋钮和调节步骤弄得晕头转向,幸好指导老师及时地给我提供了帮助,为我们介绍了操作要点,最终我花了近两个半小时完成了分光计的调节,并增强了完成衍射光栅实验的信心。在衍射光栅实验中,只要正确放置光栅的位置,就能比较顺利地完成实验测量。

回顾完成衍射光栅实验的整个过程,我有以下几点体会:

1. 完成实验之前一定要预习整个实验过程。对自己不明白的地方要查找相关资料,如果有相关的技能实验,最好选做,因为这些技能实验都是老师考虑到我们的弱项而精心选择出的实验项目,以弥补我们的基本技能的不足。
2. 实验时要认真听清老师讲解的原理和操作要点。一般我们对实验室的实验仪器是比较陌生的,通过老师的讲解,使我们对本陌生的仪器有了一定的了解,有利于我们完成实验。
3. 实验操作过程中碰到问题先自己设法解决,经过思考后若不能解决再请老师帮助,这样要比直接向老师寻求帮助对实验的认识更深刻。
4. 做实验要细心、耐心,这样我们就不会因漏掉或弄错实验操作而致使实验失败或走弯路。
5. 独立完成实验。实验是所有课程中实践性强、自由度较高的课程,在实验中我们可以充分发挥自己的动手能力,争取独立完成实验,这样对于我们思维和创造力都能起到有益的帮助。如果机械地照搬别人的做法去操作,那么实验就失去了意义。

六、思考题

1. 光栅光谱和棱镜光谱有哪些不同之处?在上述两种光谱中,哪种颜色的光偏转最大?

答:光栅光谱和棱镜光谱是采用不同的分光器件——衍射光栅和三棱镜得到的。前者依据光栅方程 $d\sin\varphi = k\lambda$ ($k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$); 后者根据不同波长的光在玻璃中的折射率不同——色散。在光栅光谱中,对于同一衍射级次 k , λ 越大 φ 也越大,即红光偏转最大;在棱镜光谱中,由于 λ 越大折射率越小,偏向角也越小,故紫光偏转最大。

2. 当狭缝太宽或太窄时将会出现什么现象?为什么?

答:狭缝太宽时谱线太亮、太宽,所以会造成较大的测量误差;狭缝太窄时谱线亮度不够,甚至会造成找不到谱线。因此应该使狭缝宽窄合适。

第三节 常用物理实验方法

物理实验包括在实验室人为再现自然界的物理现象、寻找物理规律和对物理量进行测量三部分。物理实验和物理量测量虽然不完全等同,却有着紧密的联系。在任何物理实验中,几乎都要对物理量进行测量,故有时把物理量测量称为物理实验,把具有共性的测量方法归纳起来,叫做物理实验方法。下面介绍几种常用的物理实验方法。

一、比较法

比较法是物理量测量中最普遍、最基本的测量方法。它是将被测量与标准量具进行比较而得到测量值的。比较法可分为直接比较和间接比较两类。替代法、置换法实际上也属于比较法,它们的特点是异时比较。

1. 直接比较法

直接比较是将被测量与同类物理量的标准量具直接进行比较。因此要求制成相应的供比较用的标准量具,如直尺、砝码等,它们被赋予标准量值,供比较使用。

有些物理量难以制成标准量具,因而先制成与标准量值相关的仪器,再用它们与待测量进行比较。例如温度计、电表等。有时,光有标准量具还不够,还必须配置一定的比较系统,才能实现被测量与标准量之间的比较。例如,光有砝码还不能测质量,要借助于天平;光有标准电池还不能测电压,要有比较电阻等附属装置组成的电位差计,这些装置就是比较系统。

必须指出,欲有效地运用直接比较法应考虑以下两个问题:

- (1) 创造条件使待测量与标准量能直接对比;
- (2) 无法直接对比时,则视其能否用零示法予以比较。此时只要注意选择灵敏度足够高的示零仪器即可。

2. 间接比较法

这是在测量中应用得更为普遍的比较法。因为多数物理量无法通过直接比较而测出,往往需要利用物理量之间的函数关系制成相应的仪器来简化测量过程。例如,电流表是利用通电线圈在磁场中受到的电磁力矩与游丝的扭力矩平衡时,电流的大小与电流表指针的偏转量之间有一定的对应关系而制成的,因此可以用电流表指针的偏转量间接比较出电路中的电流。

3. 替代法

有时我们利用被测量与标准量对某一物理过程具有等效的作用,而用标准量替代被测量,从而提高测量的准确度。例如用伏安法测未知电阻阻值,我们可以先读出未知电阻两端的电压值及流经它的电流值,再用标准电阻替代未知电阻,改变电阻箱的阻值,使其两端的电压值及流经它的电流值与前面相同,此时,未知电阻的阻值即与电阻箱所示的值相等。

二、补偿法

补偿法在实验中使用很普遍,它的定义如下:某系统受某种作用产生效应 A,受另一种作用产生效应 B,如果由于效应 B 的存在而使效应 A 显示不出来,就叫做 B 对 A 进行了补偿。补偿法大多用在补偿法测量和补偿法消除系统误差两个方面。

1. 补偿法测量

设某系统中 A 效应的量值为被测量对象,但由于物理量 A 不能直接测量或不易测准,就用人方法制造出一个 B 效应与 A 效应补偿,然后用测量 B 效应量值的方法求出 A 效应的量值。制造 B 效应的原则是 B 效应的量值应该是已知的或易于测准的。

完整的补偿测量系统由待测装置、补偿装置和指零装置组成。待测装置产生待测效应,要求待测量尽量稳定,便于补偿。补偿装置产生补偿效应,要求补偿量值准确达到设计的精度。测量装置可将待测量与补偿量联系起来进行比较。指零装置是一个比较系统,它将显示出待测量与补偿量比较的结果。比较方法除了上面所述的零示法外,还有差示法。零示法对应于完全补偿,差示法对应于不完全补偿。

2. 补偿法消除系统误差

用补偿法还可以修正系统误差。测量中,往往由于存在某些因素导致产生系统误差,而又无法排除,此时可以想办法制造另一种因素去补偿这种因素的影响,使这种因素的影响消

失或减弱。这个过程就是用补偿法修正系统误差。例如在光学实验中为防止由于光学器件的引入而影响光程差,在光路里常人为地适当配置光学补偿器来抵消这种影响,迈克尔逊干涉仪中的补偿板即是典型的一例。

三、放大法

测量中,有时由于被测量过分小,以致无法被实验者或仪表直接感觉和反应,那么可以先通过某种途径将被测量放大,然后再进行测量。放大被测量所用的原理和方法就称为放大法。常用放大方法有以下几种:

1. 机械放大

它是利用机械部件之间的几何关系将物理量在测量过程中加以放大,从而提高测量仪器的分辨率。

例如,游标卡尺利用游标原理进行放大。螺旋测微计、读数显微镜和迈克尔逊干涉仪中都用到了螺旋放大的原理。以上这些例子都属于机械放大。

2. 电磁放大

在电磁学物理量的测量中,如果被测量很小,常常通过电子电路放大后再进行测量;在非电量的电测量中,由于转换出来的电学量往往很微弱,这种方法几乎已成为科技人员的惯用方法,并加以深入地研究。

例如,对于微弱电流,除了可以用灵敏电流计测量外,也常用微电流放大器将其放大后再测量;光电倍增管利用电场加速电子以及电子的二次发射,实现光电流的放大。这些方法中都用到了电磁放大。

3. 光学放大

光学放大在物理实验中以及许多仪器中都得到了广泛的应用。

例如,利用光杠杆测微小的长度变化;利用镜尺法测量微小的角度;利用放大镜、望远镜、显微镜等光学仪器放大视角等。

四、归纳法

归纳法是从一系列有限的特殊事例得出一般结论的推理方法,在获得许多个别事物知识的基础上,概括出事物的一般原理的方法,是从个别到一般的推理形式和思维方法。在物理实验观察中,从一个个现象中,先得出一个个结论,然后归纳出一般的规律。归纳法是一种由特殊到一般的认识过程。

五、转换法

很多物理量,由于其属性关系,无法用仪器直接测量,或者测量不是很方便、准确性差,因此常常将这些物理量转换成其他物理量进行测量,之后再反过来求得被测物理量,这种方法叫做转换法。最常见的玻璃液体温度计,就是利用材料在一定范围内热膨胀与温度的线性关系,将温度测量转换为长度测量。

在电磁学测量发展之后,由于其具有方便、迅速、可自动控制等多种优点,人们想了很多方法将许多物理量测量转换为电学量测量。这种转换方法常叫做“非电量电测法”。激光器问世后,由于其单色性好、强度高、稳定性好等因素,人们又将某些需要精确测量的物理量转换为光学量测量,这种转换方法叫做“光测法”。光测法可以获得非常高的精度。

转换法测量最关键的器件是传感器。一般传感器都由两个部分组成,一个是敏感元件,另一个是转换元件。敏感元件的作用是接收被测信号,转换元件的作用是将所接收的信号按一定的物理规律转换为可测信号。有时,一个器件也可以同时具有上述两种功能。传感器的性能优劣,由其敏感程度及转换规律是否单一来决定。敏感程度越高,测量便越精确;转换规律越单一,干扰就越小,测量效果就越好。

传感器种类很多。从原则上讲,所有物理量,比如长度、速度、加速度、振动参量、表现粗糙度等力学量,以及温度、压力、流量、湿度、气体成分等都总能找到与之相应的传感器,从而将这些物理量转换为其他信号进行测量。转换测量方法主要有电测法和光测法。

电测法主要依靠电磁测量速度快,灵敏度高,便于自动控制和遥控等优点而被广泛地应用。实际上,传感器的制作就是根据某些物理原理和物理效应找出转换规律的。此类传感器常用的有以下几种:(1)电阻式传感器:①应变传感器,②半导体应变计,③热敏、光敏和气敏电阻传感器;(2)电感式传感器:①自感式传感器,②差动变压器式传感器,③涡流式传感器,④压磁式传感器;(3)电容式传感器;(4)压电式传感器;(5)磁电传感器——霍耳片;(6)光电传感器。

光测法是将某些物理量转换为光信号的测量,能够获得很高的精度。比如用光的干涉现象来测量物体的长度、微小位移等。另外,人们还利用声-光、电-光、磁-光等效应来进行一些特殊的测量。近年来,利用光导纤维的传输特性和集成光学技术,已经研制成不少光导纤维传感器。

六、模拟法

由于某些特殊原因,比如研究对象过分庞大,非常危险,或者变化缓慢等限制,使我们难以对研究对象直接进行测量,于是便制造了与研究对象有一定关系的模型,用对模型的测试代替对原型的测试。这种测试方法称为模拟法。模拟法包括两种类型。

1. 物理模拟

可以想象,并不是任意一个模型都可以拿来代替原型进行测量的,它还必须具备一定的条件。首先,要求模型的几何尺寸与原型的几何尺寸成比例地缩小或放大,即在形状上模型与原型完全相似,这称为几何相似。除此之外,还要求模型与原型遵从同样的物理规律,只有这样才能用模型代替原型进行这种物理规律范围内的测试,这称为物理相似。值得注意的是,模型和原型不管经过怎样的变换和处理,也只能做到某些方面的物理相似,却不可能使两种型体在所有的物理性质上完全相似。

在风洞里,用大型风扇吹动空气流动,产生具有一定流速的人造风,将飞机模型静止置于其中,调整好模型与原型的尺寸比例以及风的速度,便可用模型的动力学参量的测量,代替原型的动力学参量的测量。这种方法就是物理模拟。

2. 数学模拟

数学模拟又称类比,它和几何相似、物理相似都不相同,原型和模型在物理形式上和实质上均毫无共同之处,但它们遵守着相同的数学规律。例如在本教程第四部分基础实验中的实验十一“静电场的描绘”中,就是用稳恒电流场的等位线来模拟静电场的等位线。虽然稳恒电流场与静电场根本不是一回事,但是由电磁场理论可知,这两种场具有相同的数学方程式,两种场的解也自然相同。

第二部分 数据处理基础知识

第一节 测量误差及不确定度分析

物理实验是以测量为基础的。测量可分为直接测量与间接测量,直接测量指无需对被测的量与其他实测的量进行函数关系的辅助计算而可直接得到被测量值的测量,间接测量指利用直接测量的量与被测量之间的已知函数关系经过计算从而得到被测量值的测量。

由于测量仪器、测量方法、测量环境、人员的观察力等种种因素的局限,测量是不能无限精确的,测量结果与客观存在的真值之间总是存在一定的差异,即存在测量误差。因此分析测量中产生的各种误差,尽量消除或减小其影响,并对测量结果中未能消除的误差作出估计,给出测量结果的不确定度就是物理实验和科学实验中必不可少的工作。为此我们必须了解误差的概念、特性、产生的原因及测量结果的不确定度的概念与估算方法等有关知识。

一、误差的定义

测量结果 y 与被测量的真值(或约定真值) y_i 之差叫做误差,记为 Δy ($\Delta y = y - y_i$)。被测值的真值是一个理想的概念,一般说来真值是不知道的。在实际测量中常用准确度高的实际值来作为约定真值,才能计算误差。

二、误差的分类及其处理方法

误差主要分为系统误差和随机误差。

1. 系统误差

(1) 定义:在同一被测量的多次测量过程中,绝对值和符号保持恒定或以可预知的方式变化的误差。

(2) 产生原因

① 仪器本身的缺陷或未按规定条件使用仪器而引起的误差(又称作仪器误差)。如:电表的刻度不均匀——示值误差;等臂天平的两臂实际不等——机构误差;指针式电表使用前没调零——零位误差;大气压强计未在标定条件下使用引起的系统误差;等等。

② 测量所依据的理论公式本身的近似性、实验条件不能达到理论公式的要求或测量方法所带来的系统误差(又称作理论误差或方法误差)。如:单摆运动方程小角度近似解引起的误差、伏安法测电阻时电表内阻引起的测量误差等。

(3) 分类及处理方法

根据误差的符号、绝对值确定与否分类如下:

① 已定系统误差——绝对值和符号已经确定的系统误差分量,如零位误差、大气压强计室温下使用引起的误差、伏安法测电阻时电表内阻引起的误差等;这类误差分量一般都要修正。

② 未定系统误差——绝对值和符号未定的系统误差;对这类误差一般要估计出其分布范围(大致对应于不确定度估计中的 ΔE_i)。实验中可以通过方案选择、参数设计、计量器