

“十三五”普通高等教育规划教材

大学物理实验

祝 昆 杨文韬 郑志荣 曾应华 编著



 **机械工业出版社**
CHINA MACHINE PRESS



“十三五”普通高等教育规划教材

大学物理实验

祝 昆 杨文韬 郑志荣 曾应华 编著



机械工业出版社

本书从实验基本要求出发,对误差理论、实验数据处理的一般理论进行概述,选取了物理学各分支具有代表性的实验,按力学、热学、电学、光学和近代物理的传统方法分类组织实验。区别于传统教材,本书不是直接给出实验原理的模式,而是在实验原理部分强化了从最基本物理规律出发推导出实验所需要的测量公式,进一步引导学生从测试条件及可能性出发设计实验,加强了大学物理实验原理和大学物理课程联系的紧密程度,实现了实验与理论的有机结合,培养了学生从基本理论出发设计创新实验的能力。本书在物理实验与工程应用方面也建立了联系,对部分实验的工程应用进行了介绍。

本书可以作为高等理工院校非物理类专业的教材,也可以作为从事教学、科研和工程技术人员的参考书籍。

图书在版编目(CIP)数据

大学物理实验 / 祝昆等编著. —北京:机械工业出版社,2017.8

“十三五”普通高等教育规划教材

ISBN 978-7-111-57305-0

I. ①大… II. ①祝… 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(2017)第 187614 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:汤枫

责任编辑:汤枫

责任校对:杜雨霏

责任印制:李昂

北京宝昌彩色印刷有限公司印刷

2017年9月第1版·第1次印刷

184mm×260mm·14印张·340千字

0001-3000册

标准书号:ISBN 978-7-111-57305-0

定价:49.00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

网络服务

服务咨询热线:(010)88379833

机工官网:www.cmpbook.com

读者购书热线:(010)88379649

机工官博:weibo.com/cmp1952

教育服务网:www.cmpedu.com

封面无防伪标均为盗版

金书网:www.golden-book.com

前 言

大学物理实验是加深对物理规律理解的重要环节，是非物理类理工科学生的一门基础必修课程，为理工科学生观察自然界提供了必要的手段，有助于提高学生的实际动手能力、数据采集能力、数据分析和处理能力，为进一步学习后续课程打下坚实的实验技能基础，初步培养了学生的科研技能。

本书的编写目的是让学生在理解实验原理的基础上，自己设计实验步骤和数据记录表格，完成实验操作和进行实验数据处理以及撰写实验报告，通过实验初步理解实验相关原理在工程应用实践中的运用。基于这种想法，本书在实验原理部分加大了对实验原理表述的篇幅，对每个实验原理基本上按照由基本的物理规律逐步推导出实验需要的公式的思路来编写的。

本书第1章和第6章由祝昆编写，第2、3、4、5、7章由杨文韬执笔，郑志荣提供了各实验的仪器简介资料。在编写过程中得到了许多同志的鼎力协助，曾应华、王立威、尹跃、张万贺、翟影、强睿、陈函、刘海、康世举、庞明艳等老师在本书编写过程中做了大量的工作，物理系学生杨小菊承担了大量资料整理工作。

本书是在杭州大华仪器制造有限公司院士工作站张钟华院士、高洁院士的关心和指导下完成的，院士工作站王震、郑捷、夏明荣做了大量工作。清华大学朱鹤年教授，中国计量大学蔡晋辉院长，中航工业计量所（原304所）付军立高级工程师，原上海电表厂资深专家张根才、东亚萍、田伯昂，上海仪器仪表研究所滕华强所长，EDM公司马文达，安徽省电力科学研究院汪建，上海中学刘铭基等专家提供了大力支持和帮助，并提出了宝贵的修改意见。谨向提供帮助的专家和参与本书工作的所有人员表示衷心的感谢。

鉴于时间和作者水平所限，书中错误在所难免，敬请各位读者斧正。

编 者

本书所使用的符号

物理量	符号	单位	物理量	符号	单位
绝对误差	Δ		频率	f	Hz
随机误差	δ_i		长度	l	m
相对误差	δ		半径	r	m
残差平方和	RSS		直径	d	m
位移	s	m	面积	S	m ²
加速度	a	m/s ²	速度	v	m/s
质量	m	kg	重力加速度	g	m/s ²
比定压热容	c_p	J/(kg·K)	雷诺数	Re	
比定容热容	c_v	J/(kg·K)	压强	p	Pa
气体的比热容比	γ		黏度	η	Pa·s
直流电阻	R	Ω	导热系数	λ	W/(m·K)
交流电阻	r	Ω	电源内电阻	R_0	Ω
电导率	σ	S/m	电阻率	ρ	$\Omega \cdot m$
直流电压	U	V	面积法向量	n	
交流电压	u	V	时间	t	s
直流电流	I	A	热量	Q	J
交流电流	i	A	线密度	ρ_l	kg/m
(体)密度	ρ	kg/m ³	弹性模量	E	Pa
电流密度矢量	J	A/m ²	切变模量	G	Pa
电场强度矢量	E	V/m	转动惯量	J	kg·m ²
		或 N/C	切应变	γ	
电感	L	H	或切变角		
角频率	ω	rad/s	电容	C	F

目 录

前言	
本书所使用的符号	
第1章 绪论	1
1.1 大学物理实验课程开设的意义	1
1.2 大学物理实验的任务及要求	1
1.3 大学物理实验的主要环节	2
1.4 物理实验的纪律要求	4
1.5 物理实验报告参考模板	5
第2章 实验数据处理	6
2.1 测量概述	6
2.1.1 测量的定义	7
2.1.2 测量的分类	8
2.1.3 等精度测量与非等精度测量	8
2.1.4 测量结果的有效数字	8
2.2 误差理论	9
2.2.1 误差的基本概念	9
2.2.2 误差的种类	10
2.3 测量的准确度、精密度、精确度和不确定度	11
2.3.1 测量的准确度、精密度、精确度	11
2.3.2 测量的不确定度	11
2.4 实验数据处理的常用方法	14
2.4.1 数据处理的基本原理	14
2.4.2 数据处理的常用方法	22
2.4.3 办公数据处理软件 Microsoft Office Excel 介绍	28
2.4.4 数据处理软件 OriginLab OriginPro 介绍	28
第3章 力学实验	32
3.1 长度测量	32
3.2 物体密度的测定	37
3.3 弹力和弹簧伸长的关系实验研究	41
3.4 直线运动研究	44
3.5 用单摆测定重力加速度	48
3.6 音叉的受迫振动与共振	51

3.7	弦振动特性实验研究	54
3.8	三线摆法测定物体的转动惯量	58
3.9	扭摆法测定材料的切变模量	65
3.10	扭摆法测定材料的转动惯量	72
3.11	霍尔位置传感 - 弯曲法测弹性模量	76
3.12	声速的测定	81
3.13	动量守恒定律的验证	91
第4章	热学实验	96
4.1	空气比热容比的测定	96
4.2	液体表面张力系数的测定	100
4.3	落球法测量液体黏度	103
4.4	导热系数的测定	109
4.5	斯特林热机实验	116
第5章	电学实验	121
5.1	电学仪表使用准则	121
5.2	限流与分压电路特性研究	121
5.3	伏安法测电阻元件特性	124
5.4	半导体二极管特性的测定	127
5.5	电表改装与校准	132
5.6	惠斯顿电桥测中值电阻	140
5.7	直流电位差计精确测量电压	148
5.8	交流电桥实验	150
5.9	温度传感器的温度特性测量和研究	160
5.10	示波器的使用	164
5.11	磁阻尼和动摩擦系数的测量	166
第6章	光学实验	172
6.1	杨氏双缝干涉实验	172
6.2	等厚干涉——牛顿环	175
6.3	夫琅和费圆孔衍射	178
6.4	迈克耳孙干涉仪的调节和使用	179
第7章	近代物理实验	185
7.1	液晶电光效应实验	185
7.2	弗兰克 - 赫兹实验	191
7.3	太阳能电池基本特性测试	199
7.4	光电效应法测定普朗克常量实验	206
附录		213
附录 A	相关技术标准目录	213
附录 B	物理实验常用数据表	213
参考文献		218

第1章 绪 论

物理学是研究物质的基本结构、基本运动形式、相互作用及其转化规律的自然科学。它的基本理论渗透在自然科学的各个领域，应用于生产技术的许多部门，是其他自然科学和工程技术的基础。

物理学本质上是一门实验科学。物理实验是科学实验的先驱，体现了大多数科学实验的共性，其实验思想、实验方法以及实验手段等方面是各学科科学实验的基础。

1.1 大学物理实验课程开设的意义

大学物理实验课是高等理工科院校对学生进行科学实验基本训练的必修基础实践课程，是本科生接受系统实验方法和实验技能训练的开端。

大学物理实验课覆盖面广，具有丰富的实验思想、方法和手段，同时能提供综合性很强的基本实验技能训练，是培养学生科学实验能力、提高科学素质的重要基础。它在培养学生严谨的治学态度、活跃的创新意识、理论联系实际和适应科技发展的综合能力等方面具有其他实践类课程不可替代的作用。

1.2 大学物理实验的任务及要求

1. 本课程的具体任务

1) 培养学生的基本科学实验技能，提高学生的科学实验基本素质，使学生初步掌握科学实验的思想和方法。培养学生的科学思维和创新意识，使学生掌握实验研究的基本方法，提高学生的分析能力和创新能力。

2) 提高学生的科学素养，培养学生理论联系实际和实事求是的科学作风，认真严谨的科学态度和积极主动的探索精神，以及遵守纪律，团结协作，爱护公共财产的优良品德。

2. 教学内容要求

大学物理实验应包括普通物理实验（力学、热学、电磁学、光学实验）和近代物理实验，具体的教学内容基本要求如下：

1) 掌握测量误差的基本知识，具备正确处理实验数据的基本能力。

① 掌握测量误差与不确定度的基本概念，能逐步学会用不确定度对直接测量和间接测量的结果进行评估。

② 学会处理实验数据的一些常用方法，包括列表法、作图法和最小二乘法等。随着计算机及其应用技术的普及，也应包括用计算机通用软件处理实验数据的基本方法。

2) 掌握基本物理量的测量方法。

例如，长度、质量、时间、热量、温度、湿度、压强、压力、电流、电压、电阻、磁感

应强度、光强度、折射率、电子电荷、普朗克常量、里德堡常量等常用物理量及物性参数的测量，注意加强数字化测量技术和计算技术在物理实验教学中的应用。

3) 了解常用的物理实验方法，并逐步学会使用。

例如，比较法、转换法、放大法、模拟法、补偿法、平衡法和干涉、衍射法，以及在近代科学研究和工程技术中广泛应用的其他方法。

4) 掌握实验室常用仪器的性能，并能够正确使用。

例如，长度测量仪器、计时仪器、测温仪器、变阻器、电表、交/直流电桥、通用示波器、低频信号发生器、分光仪、光谱仪、常用电源和光源等常用仪器。各校应根据条件，在物理实验课中逐步引进在当代科学研究与工程技术中广泛应用的现代物理技术，例如，激光技术、传感器技术、微弱信号检测技术、光电子技术、结构分析波谱技术等。

5) 掌握常用的实验操作技术。

例如，零位调整、水平/铅直调整、光路的共轴调整、消视差调整、逐次逼近调整、根据给定的电路图正确接线、简单的电路故障检查与排除，以及在近代科学研究与工程技术中广泛应用的仪器的正确调节。

6) 适当介绍物理实验史料和物理实验在现代科学技术中的应用知识。

3. 能力培养基本要求

1) 独立实验的能力。能够通过阅读实验教材、查询有关资料和思考问题，掌握实验原理及方法、做好实验前的准备；正确使用仪器及辅助设备、独立完成实验内容、撰写合格的实验报告；培养学生独立实验的能力，逐步形成自主实验的基本能力。

2) 分析与研究的能力。能够融合实验原理、设计思想、实验方法及相关的理论知识对实验结果进行分析、判断、归纳与总结。掌握通过实验进行物理现象和物理规律研究的基本方法，具备初步的分析与研究的能力。

3) 理论联系实际的能力。能够在实验中发现、分析问题并学习解决问题的科学方法，逐步提高学生综合运用所学知识和技能解决实际问题的能力。

4) 创新能力。能够完成符合规范要求的设计性、综合性内容的实验，进行初步的具有研究性或创意性内容的实验，激发学生的学习主动性，逐步培养学生的创新能力。

4. 学时要求和分组要求

1) 物理实验课程一般不少于 54 学时；对于理科、师范类非物理专业和某些需要加强物理基础的工科专业建议实验学时一般不少于 64 学时。

2) 分组实验一般每组 1~2 人为宜。基础性实验最好一人一套仪器。

1.3 大学物理实验的主要环节

物理实验教学过程主要包括 3 个重要环节：预习、课堂操作和完成实验报告。每个环节对应相应的考评成绩。

1. 预习

实验预习是指在实验前通过认真阅读实验教材、仪器使用说明书或相关资料，明确实验的目的、掌握实验原理及方法、制订实验主要步骤，了解仪器使用时的注意事项；通过现场操作掌握实验数据获取的方法和主要操作步骤，写出预习报告。预习报告是实验的前期准备

工作，是写给自己参考用的，故要求简单明了。写清楚本次实验应达到什么目的，以及通过什么实验方法和测量哪些数据才能达到实验目的。每次实验前须检查预习报告，合格后方可进入课堂操作环节。预习报告主要包括以下5个方面：

- 1) 实验目的。明确本次实验项目所要达到的目的。采用要点形式写出实验的主要理论依据、实验和数据处理的办法，以及仪器的使用等。一般包括1~3个要点。
- 2) 实验仪器设备。写出实验仪器的名称、型号。
- 3) 实验原理及方法。写出需要解决的主要问题、理论依据和条件，测量时用到的主要公式（包括适用条件的假设，标明已知量、指定量和待测量）和测量待测物理量所采用的方法，画出必要的原理图（包括示意图或电路图、光路图等）。
- 4) 实验步骤及注意事项。简要写出主要操作过程及步骤。重点写出仪器调整的方法、以及待测物理量的测量步骤和仪器操作中需要注意的有关事项。
- 5) 数据记录。列举实验需要记录的有关物理量，如温度、气压等；设计并画出实验数据记录表格，一般包含待测物理量及单位、测量次数。注意有效数字记录位数和待测物理量的单位。

预习报告是指导自我完成实验的重要参考资料，一定要在领会实验项目要求的基础上独立科学地制定方案，保证课堂操作的顺利完成。需要单独制作一张数据记录表格便于交给老师检查。

2. 课堂操作

课堂操作是有效完成物理实验的中心环节。通过课堂操作能够掌握实验的基本原理和操作技能，达到实验的教学目的。课堂操作是指在实验指导教师讲解完实验要求后所做的工作。主要包括准备、调试仪器、观测与数据记录、整理仪器等4个方面。

1) 准备。预习报告检查合格后，按照排序到达指定的实验桌前，根据实验仪器清单检查仪器状况并签字确认仪器是否能够正常使用。若发现问题举手向老师报告。若仪器状况正常可进行下一环节的工作。

2) 调试仪器。按照预习报告和仪器说明书的要求对仪器进行调试，例如，仪器的摆放，水平或者铅直的调节，电表的调零、零点电流的调零等。调试时必须按照仪器操作规程进行。需要通电调节的一定让老师检查并允许后进行以免烧坏仪器。

3) 观测与数据记录。在明确了实验目的和测量内容、步骤并能正确使用仪器之后，可以进行正式观测和数据记录，观测时要精力集中，尽量排除外界的干扰（也要注意不要影响别人）；记录时要如实记录观测数据和观察到的现象，注意有效数字的选取。记录的内容是以后计算与分析问题的依据，是实验宝贵的第一手资料。要求记录实验的环境条件、仪器的精度、规格及测量单位，测量的原始数据（包括异常数据），实验中也需记录调整仪器的重要细节，实验出现异常需要作记录，详细描述异常发生的条件、现象，实验异常不一定是实验错误，有可能是新的物理规律在起作用。

记录要做到准确无误。通常数据记录在实验原始记录本上（建议每个学生准备一个专门做实验的日记本，养成随时记录实验过程的良好习惯，记录内容一般包括实验操作细节、实验现象、根据测量数据临时修改的实验方案、修改的影响及实验效果、实验数据），经过整理后填入预习报告数据记录表格交给老师检查。

注意数据测量完成后及时将仪器调节到待机状态以免损坏仪器，如关闭电源或调节到安

全的位置等,但不要及时拆除实验系统以便于测量数据不合理时重新测量。

4) 整理仪器。数据经老师检查合理后,进入仪器整理环节。按照开始实验前状态整理仪器,检查实验记录情况。由老师或者组长检查无问题后离开实验室。

课堂操作部分必须做到守纪律遵规程,以免出现不必要的安全事故和仪器损坏情况,有问题及时报告老师进行处理。

3. 实验报告

实验报告是实验工作的总结,要用简明的形式说明实验的情况、结果和个人的体会。实验报告是写给同行看的,所以必须充分反映自己的工作收获和结果,反映自己的能力水平,要有自己的特色,要有条理性,并注意运用科学术语,实验报告撰写要求文字通顺,字迹端正,图表规范,结果合理。完整的实验报告应包括下述 10 个部分的内容:

1) 实验名称。

2) 实验环境。实验环境包括时间、地点、温度、天气情况(如气压、潮湿程度等)、同实验人等。

3) 实验目的。实验目的按照要点形式写。

4) 实验原理及方法。用简明规范的语言阐明实验原理及方法,是实验的核心内容,只有实验原理正确才能设计出合理的实验方案。在实验中学生要逐渐培养根据实验原理设计实验测量参数和实验步骤的能力,近年来实验中很多学生严重轻视原理现象,实验前后完全不知道实验中验证了理论课中的哪个原理,由于实验设计中很多原理是教材中的原理运用高等数学知识的近似处理而获得的,所以建议学生在预习时自己推导实验原理而不是抄一遍教材的实验公式,最后连自己也不知道公式来源,实验后很快遗忘,根本达不到提高实验技能的能力。实验原理部分包括实验原理图、电路图或光路图,以及主要计算公式,数据处理方法的选用等,应注意以实际实验所用原理来写。

5) 主要实验仪器设备。列出主要仪器名称、型号、编号和共用仪器,必要时需要记录仪器产地、精度等重要信息。

6) 实验主要步骤。列出课堂实验的主要实验步骤。

7) 数据记录。列出实验中有用的数据,原始数据尽量采用表格形式,并正确表示出有效数字和单位。注意必须是实验过程中的原始数据或者预习报告中实验记录表格中整理过的数据,不能有处理过的数据出现。

8) 数据处理及分析。利用不确定度理论对原始数据进行评价,利用误差理论对实验中存在的误差进行分析说明。数据计算过程只包括公式、代入数据和结果三部分,中间演算过程不写在报告上。作图要规范,表格要清晰。具体处理方法见第 2 章。

9) 实验结论。列出实验结论。注意正确的表达形式,语言简明扼要。

10) 实验心得及体会。写出实验中遇到的问题和反思,提出对实验的改进措施,给出课后思考题的答案等。

1.4 物理实验的纪律要求

为了高效完成物理实验课程,取得良好的学习效果,学生必须认真遵守下列纪律要求:

1) 预习时必须按照教师要求学会仪器使用和测量方法。不能无故以任何理由不完成任

何实验教学环节。

2) 课堂操作前必须撰写预习报告。未撰写预习报告(或未预习)的,教师有权停止本次实验操作。

3) 实验使用对应序号实验项目的设备,检查仪器完好后签字确认仪器状况。

4) 遵守课堂纪律,保持安静的实验环境。

5) 按照仪器使用要求,规范操作,完成数据采集。使用电源时,必须经教师检查线路并许可后才能接通电源。

6) 爱护实验仪器。实验中按照仪器说明书使用仪器,违反操作规范造成仪器损坏的需要填写出事故说明书,并按照相关管理规定赔偿。共用工具或仪器使用后立即归还原处。

7) 完成实验后,使仪器处于安全待机状态并将实验数据交教师检查签字。若检查通过,整理好仪器,填写实验室相关实验记录文件,然后离开;若不通过,重新测量数据。

8) 原始数据记录须经教师检查、签名确认,附在实验报告上,无原始数据的实验报告视为不合格。

9) 实验报告必须在规定时间内以组为单位交到实验室。

1.5 物理实验报告参考模板

大学物理实验报告

实验人: _____ 学 号: _____ 班级: _____

同组人: _____ 指导教师: _____ 成绩: _____

一、实验名称 _____

二、实验环境

实验时间: 20 ____年__月__日 实验地点: _____

气 压: _____ 气 温: _____

三、实验目的

四、实验原理及方法

五、主要实验仪器设置

六、实验主要步骤

七、数据记录

八、数据处理及分析

九、实验结论

十、实验心得及体会

第2章 实验数据处理

2.1 测量概述

测量是生产、生活和科学实验中获得客观事物的定量信息的主要手段，是人类认识和改造客观世界的主要方法。研究物理现象、了解物质特性和验证物理规律离不开测量，测量是物理实验的基础。然而，测量的结果不可避免包含误差，对误差进行分析，客观地对测量结果进行合理表征是物理实验需要解决的关键问题。可靠的实验结果对于研究客观规律具有基础支撑作用。因此，了解和掌握误差理论和不确定度评价方法的初步知识是大学物理实验主要的教学目的之一。这部分理论往往会涉及较为复杂的实验技术和数理统计理论，本章只介绍一些初步的知识，较为复杂的知识可以参看相关理论文献。实验准备关系图如图 2-1 所示。物理实验涉及的知识逻辑图如图 2-2 所示。

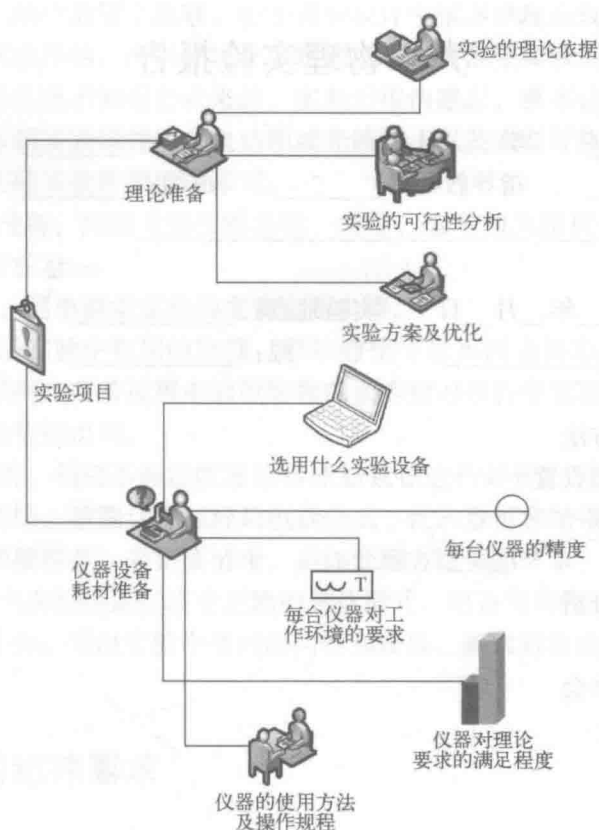


图 2-1 实验准备关系图

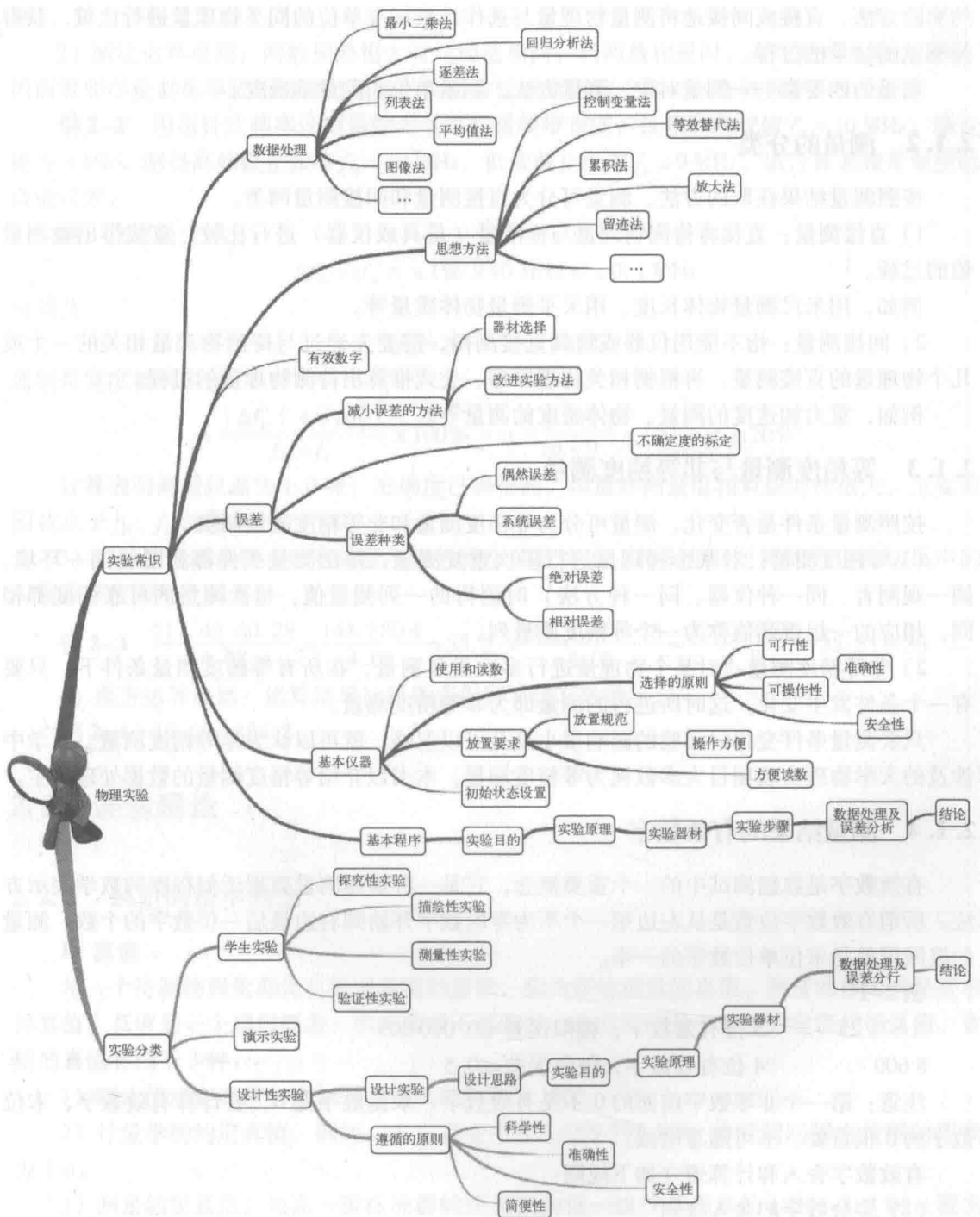


图 2-2 实验涉及的知识逻辑图

2.1.1 测量的定义

用实验方法获得物理量量值的过程称为测量。物理量的测量是借助实验仪器，采用一定

的实验方法，直接或间接地将测量物理量与选作计量标准单位的同类物理量进行比较，获得待测量的结果的过程。

测量的四要素——测量对象、测量方法、测量单位和测量准确度。

2.1.2 测量的分类

按照测量结果获取的方法，测量可分为直接测量和间接测量两类。

1) 直接测量：直接将待测物理量与标准量（量具或仪器）进行比较，直接得出被测量值的过程。

例如，用米尺测量物体长度、用天平测量物体质量等。

2) 间接测量：指不能用仪器或量具直接测得，需要先通过与待测物理量相关的一个或几个物理量的直接测量，再根据相关物理原理、公式推算出待测物理量的过程。

例如，重力加速度的测量、物体密度的测量等。

2.1.3 等精度测量与非等精度测量

按照测量条件是否变化，测量可分为等精度测量和非等精度测量两类。

1) 等精度测量：对某个物理量进行多次重复测量，每次测量条件都相同（同一环境、同一观测者、同一种仪器、同一种方法）时测得的一系列测量值，每次测量的可靠程度都相同，相应的一组观测值称为一个等精度测量列。

2) 非等精度测量：对某个物理量进行多次重复测量，在所有等精度测量条件下，只要有一个条件发生变化，这时所进行的测量即为非等精度测量。

只要测量条件变化对实验的影响很小甚至可以忽略，就可以认为是等精度测量。教学中涉及的大学物理实验项目大多数视为等精度测量，本书以介绍等精度测量的数据处理为主。

2.1.4 测量结果的有效数字

有效数字是数据测试中的一个重要概念，它是一种描述测量数据近似程度的数学表示方法。所谓有效数字位数是从左边第一个不为零的数字开始到右边最后一位数字的个数。测量的极限误差是末位单位数字的一半。

例 2-1

0.871 25 5 位有效数字，极限误差 $\leq 0.000\ 005$

8 600 4 位有效数字，极限误差 ≤ 0.5

注意：第一个非零数字前面的 0 不是有效数字；末位数字是 0，要计算有效数字，末位数字的 0 很重要，不可随意增减。

有效数字舍入和计算遵守如下规则：

(1) 多余数字的舍入规则

以保留数字的末位为基本单位，其下一位大于 0.5 个单位，末位进 1；小于 0.5 个单位，末位不变；如果刚好为 0.5 个单位，则末位是奇数或其下一位后跟有并非全部为 0 的数字时，末位进 1，末位为偶数时不进位。

(2) 有效数字的运算规则

1) 加法运算规则：有效数字的位数以小数点后位数最少的为准（以有效数字最少者为

准), 其余各数可多取 1 位。

2) 减法运算规则: 两数相差很大时与加法相同; 当两数相近时, 有可能产生很大误差, 因而需要尽量避免导致相近两数相减的测量方法或者运算中多一些有效数字。

例 2-2 用指针式频率计测量放大电路的通频带宽度, 仪器的满度值 $f_m = 10 \text{ MHz}$, 准确度为 $\pm 1\%$ 。测得高端截止频率 $f_H = 10 \text{ MHz}$, 低端截止频率 $f_L = 9 \text{ MHz}$, 试计算通频带宽度的合成误差。

解: 仪器最大误差:

$$\Delta f_m = \delta f_m = \pm 1\% \times 10 \text{ MHz} = \pm 0.1 \text{ MHz}$$

也就是

$$\Delta f_H \approx \Delta f_L = \pm 0.1 \text{ MHz}$$

通频带宽度相对误差:

$$\pm \frac{|\Delta f_H| + |\Delta f_L|}{f_H - f_L} \times 100\% = \pm \frac{0.1 + 0.1}{10 - 9} \times 100\% = \pm 20\%$$

计算表明测量仪器为 1.0 级, 准确度已经很高, 但最终测量值相对误差却很大, 主要原因就在于 f_H 、 f_L 的值相近。

3) 乘除法运算规则: 以有效数字位数最少的数为准, 其余参与运算的数字及结果中的有效数字位数与之相等。

例 2-3 $\frac{517.43 \times 0.28}{4.08} = \frac{144.8804}{4.08} \approx 35.5 \rightarrow \frac{517.43 \times 0.28}{4.08} \approx \frac{520 \times 0.28}{4.1} \approx 35.51 \approx 36$

4) 乘方运算规则: 运算结果比原数多保留 1 位有效数字。

例 2-4 $19.6^2 \approx 384.2$

2.2 误差理论

2.2.1 误差的基本概念

1. 真值

每一个待测物理量都具有客观真实的量值, 称为该物理量的真值。测量的目的就是要求得真值。真值是一个理想概念, 具有客观不可知性。在实际测量中常用约定值代替真值。常用的真值有以下 3 种:

1) 理论值或定义值。例如, 三角形内角和为 180° 。

2) 计量学的约定真值。例如, 光在真空中在 $1/299\,792\,458 \text{ s}$ 的时间间隔内传播的距离为 1 m 。

3) 测量约定真值。当高一级标准器的误差仅为低一级仪器误差的 $1/20 \sim 1/3$ 时, 视为约定真值。

2. 误差

测量值与真值之间总存在一定差异。测量值与真值之差称为测量误差, 简称误差。按表现形式分为绝对误差和相对误差。其中:

$$\text{绝对误差 } \Delta_i = \text{测量值 } X_i - \text{真值 } X \quad (2-1)$$

$$\text{相对误差 } \delta = \frac{\text{测量的绝对误差 } X_i}{\text{被测量的真值 } X} \times 100\% \quad (2-2)$$

绝对误差和相对误差只反映单次测量结果与真值之间的关系。对于相同的被测量，绝对误差可以评定其测量准确度的高低，但是对于不同的被测量应采用相对误差来评定测量准确度的高低。

3. 测量的任务

由于真值的不可知性，误差也具有不可知性。故测量的任务不在于获得准确的真值而是通过仪器和实验方法找到最接近于真值的测量结果。具体来说，测量的任务是：

- 1) 科学设计合理的测量方案，选用合适的仪器使测量误差最小。
- 2) 根据测量的原始数据得出最接近真值的测量结果——被测量最佳估计值。
- 3) 估计测量的精确度，即测量最佳估计值与真值的接近程度和可靠程度，并科学地表达出来。
- 4) 对测得的数据标定不确定度。

正确分析不确定度有助于学生学会分析误差的来源并寻找减小误差的方案。学会分析误差来源，合理评价测量结果是大学物理实验课程的主要教学目的之一，在测量中应该尽可能消除或减少误差的影响，抓住主要矛盾，忽略次要矛盾。掌握误差基本分析理论和方法对于做好物理实验具有十分现实的意义。下面介绍一些物理实验中能够用到的测量误差的基本知识。

2.2.2 误差的种类

按照误差产生的原因和性质特点，误差可分为系统误差、随机误差和粗大误差。

1. 系统误差

系统误差是在同一实验条件下（方法、仪器、环境和观测者不变）多次测量同一量值时，绝对值和符号保持不变，或者在条件改变时按一定规律变化的误差，它是可以重复出现的误差。由于系统误差特有的规律性，可采取一定的方法削减或消除。系统误差的规律性往往和实验仪器、实验原理有关。导致系统误差产生的因素包括：

- 1) 测量装置因素。测量仪器结构设计原理缺陷，如杠杆齿轮测微仪的直线位移和转角不成比例的误差；仪器零件制造和安装不正确，如标尺标记的偏差、度盘和指针的安装偏心、仪器导轨误差、天平不等臂；仪器制造偏差，如标准环规的直径偏差等。
- 2) 环境因素。测量时的实际温度对标准温度的偏差，及测量过程中温度、湿度、压强等按一定规律变化的误差。
- 3) 测量方法因素。由于采用近似的测量方法和近似的计算公式等引起的误差。
- 4) 测量人员因素。由于测量者的个人特点，在估计读数时，习惯偏于某一方向；动态测量时，记录某一信号有滞后的倾向。

由于变化规律不同，系统误差可以分为不变的系统误差、线性变化系统误差、周期性变化系统误差和复杂规律系统误差等。

2. 随机误差

随机误差指的是在对同一被测量进行多次等精度重复测量时，得到一系列不同的测量值（常称为测量列），每个测量值都含有误差，这些误差的出现没有规律可循，不可能由前一