

吴平 龚宁 巴璞 编

大学物理实验

DAXUE WULI SHIYAN



西南交通大学出版社

大学物理实验

W395

吴平 龚宁 巴璞 编

西南交通大学出版社

· 成 都 ·

内 容 简 介

本书是依据国家教委颁布的《高等工业学校物理实验课程教学基本要求》，总结了多年物理实验教学改革的经验编写的。全书共 7 章，简要介绍了误差及数据处理的基础知识、物理实验中常用的基本方法和基本实验技术，共包括 12 个基础实验和 15 个综合性、设计性实验。

本书可作为高等工科院校各专业物理实验课教材，也可供一般工程技术人员参考。

图书在版编目 (C I P) 数据

大学物理实验 / 吴平, 龚宁, 巴璞编. — 成都: 西南交通大学出版社, 2004.2
ISBN 7-81057-829-4

I. 大... II. ①吴...②龚...③巴... 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 125475 号

大 学 物 理 实 验
吴 平 龚 宁 巴 璞 编

*

责任编辑 王 旻

封面设计 何东琳设计工作室
西南交通大学出版社出版发行

(成都二环路北一段 111 号 邮政编码: 610031 发行部电话: 87600564)

<http://press.swjtu.edu.cn>
E-mail: cbsxx@swjtu.edu.cn

四川森林印务有限责任公司印刷

*

开本: 787 mm × 1092 mm 1/16 印张: 11.75

字数: 274 千字

2004 年 2 月第 1 版 2004 年 2 月第 1 次印刷

ISBN 7-81057-829-4/O · 060

定价: 18.00 元

前 言

科学实验是科学理论的源泉，是工程技术的基础。高等学校不仅要使学生具备比较深广的理论知识，而且要使学生具有从事科学实验的较强能力。以适应科学技术的不断进步和国家建设迅速发展的需要。

大学物理实验是理工科学生必修的一门重要基础实验课。按照《高等工业学校物理实验课程教学基本要求》，本教材在第 1 章中介绍了物理实验课的地位、作用 and 任务；物理实验课的基本程序和要求；实验报告要求，以求让学生对物理实验课有初步的了解。在第 2 章、第 3 章中阐述了测量误差和数据处理的基本知识，这些内容是实验的理论知识，是进行实验结果评价的基础。第 4 章、第 5 章介绍了常用基本实验方法和基本实验技术。从学生的实验能力出发，本教材将实验内容分为两类：基础实验和综合、设计性实验。在第 6 章基础实验中主要注重对学生进行基本实验知识、基本实验方法、常规实验仪器的使用介绍和实验基本技能的训练；为了培养学生的实验素养和提高学生的实验能力，在第 7 章中安排了综合、设计性实验，着重培养学生独立分析问题和解决问题的能力。

本教材编写人员有：吴平（第 1 章～第 5 章）、龚宁（实验 6.1、6.4、6.5、6.10～6.12、7.3、7.6～7.8、7.11～7.14）、巴璞（实验 6.2、6.3、6.6～6.9、7.2、7.4、7.5、7.9、7.10）、杨仕君（实验 7.1）。

实验教材的编写是在实验室建设基础上进行的，它是集体智慧和集体劳动的结晶。在教材的编写过程中，我们征求了许多实验教师和同学的意见，参考了许多兄弟院校的实验教材，西南交通大学郭开惠老师审阅了第 1 章～第 5 章，并提出了许多宝贵意见，西南交通大学袁玉辉老师对本教材给予了许多指导，并审阅了全书，在此我们表示衷心感谢。

由于水平和时间限制，本教材中难免有不妥和疏漏，欢迎读者提出建议并指正。

编 者

2003 年 10 月

目 录

第 1 章 绪 论	1
1.1 物理实验课程的地位、作用和任务	1
1.2 物理实验课的基本程序和要求	2
1.3 实验报告	3
第 2 章 误差理论的基础知识	8
2.1 测量与误差	8
2.2 系统误差的发现和消除	12
2.3 随机误差的统计处理	15
2.4 仪器误差	18
2.5 测量结果的不确定度	21
2.6 测量结果的表示	26
第 3 章 数据处理的基础知识	28
3.1 有效数字及其表示	29
3.2 列表法	29
3.3 作图法	29
3.4 最小二乘法	31
3.5 逐差法	33
第 4 章 物理实验中常用的基本方法	40
4.1 比较法	40
4.2 交换法	41
4.3 放大法	41
4.4 模拟法	42
4.5 转换测量法	43
4.6 光学测量法	43
第 5 章 物理实验中的基本实验技术	45
5.1 仪器初态和安全位置调整	45
5.2 零位调整	45
5.3 水平、铅直调整	45
5.4 避免空程误差	46
5.5 逐次逼近调整	46
5.6 消视差调整	46
5.7 光路的共轴调节	47

5.8	电学实验操作规则	47
5.9	光学实验注意事项	47
5.10	暗室技术(显影和定影)	48
第6章	基础实验	50
6.1	金属杨氏弹性模量的测定	50
6.2	空气的比热容比测定	56
6.3	固体热膨胀系数	59
6.4	液体粘度测量	61
6.5	电学基础实验	64
6.6	示波器的调整和使用	73
6.7	霍尔效应及霍尔元件基本参数测量	80
6.8	惠斯通电桥测量电阻	85
6.9	静电场模拟实验	88
6.10	光学基础实验	92
6.11	分光计的调整与使用	102
6.12	光的等厚干涉测量	109
第7章	综合性、设计性实验	116
7.1	电子束聚焦和偏转研究	116
7.2	示波器测声速	122
7.3	偏振光的研究	126
7.4	迈克尔逊干涉仪的调整与使用	131
7.5	CCD测光强分布	136
7.6	光电效应测定普朗克常量	140
7.7	全息照相实验	143
7.8	光谱分析实验	149
7.9	密立根油滴实验	154
7.10	单摆测量重力加速度	158
7.11	自组补偿电路测量电动势	161
7.12	介质折射率的测定	163
7.13	自组光路测凹透镜的焦距	171
7.14	自组望远镜	171
7.15	光栅测量	172
附表		177
A.	基本物理常数表	177
B.	国际单位制简介	178
C.	常用物理数据	179
参考文献		182

第1章 绪 论

物理学是实验科学，实验是物理学的基础。从人们认识客观事物的规律来看，总是从实验事实出发，经过分析和归纳，上升为理论，然后再回到实践中去指导实践，并接受实践的检验。在物理学的发展中物理实验一直起着十分重要的作用，在科技高速发展的今天，物理实验又成为了探索和开拓新科技领域的有力工具。

物理实验是用实验的方法去研究物理学的规律，它不同于物理理论，它有自身的特点。物理实验主要包括：实验知识、实验方法、实验仪器的使用、实验数据处理等方面的内容。在高等学校开设物理理论课和物理实验课，反映了物理学研究方法的两个方面。两门课有密切联系，也有明显区别，在学习时要注意它们各自的特点。

1.1 物理实验课的地位、作用和任务

物理实验是对高等工科院校学生进行科学实验基本训练的基础课程。它不仅可以加深学生对物理理论的理解，更重要的是使学生在实验方法和实验技能方面得到较为系统、严格的训练，使学生了解科学实验的主要过程和基本方法，为今后的科学实验活动和工程应用奠定初步基础。物理实验的思想方法、分析问题与解决问题的方法对提高学生的科学素养将起着潜移默化的作用。整个实验教学活动的进行也将有助于学生的作风、态度及品德的培养。

物理实验课的具体任务是：

(1) 通过对物理实验现象的观察、分析和对物理量的测量，学习运用理论指导实验，用理论分析和解决实验中存在的问题，加深对物理理论的理解。

(2) 培养和提高学生的科学实验能力。其中包括：

① 能够自行阅读实验教材或资料，概括实验原理和方法的要点，做好实验前的准备。

② 能够借助教材或仪器说明书正确使用常用仪器，掌握基本物理量的测量方法和实验操作技能。

③ 能够运用物理学理论对实验现象进行初步的分析判断。

④ 能够正确记录和处理实验数据、绘制实验曲线、分析实验结果、撰写合格的实验报告。

⑤ 能够完成简单的具有设计性内容的实验。

(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, 遵守纪律、团结协作和爱护公物的优良品德。

1.2 物理实验课的基本程序和要求

物理实验是学生在老师指导下进行的。物理实验的教学效果与学生的主观努力密切相关。物理实验教学一般可分为三个阶段: 实验预习、实验操作、实验总结。为达到物理实验课的教学目的, 学生应重视物理实验教学的三个阶段。

1. 实验预习

预习是实验前的准备工作。学生首先要明确本次实验的目的, 仔细阅读实验教材或有关的资料, 基本理解实验所依据的理论和所采用的实验方法; 通过阅读本实验的相关资料, 整理出控制物理过程的关键、必要的实验条件及实验注意事项, 初步了解实验内容和实验步骤; 了解仪器的结构、使用方法和调整方法; 能回答实验的预习思考题。在此基础上写出实验预习报告。根据实验任务在实验原始数据记录纸上画好记录数据的表格。课前预习的好坏至关重要, 只有在充分准备之后, 才能主动地、顺利地进行实验, 达到事半功倍的效果。

2. 实验操作

学生进入实验室后应遵守实验室规则, 想象自己是在进行一项研究工作。要合理地布置仪器, 爱护仪器设备, 安全操作, 注意细心观察实验现象, 认真钻研和探索实验中的问题。在实验中要脑手并用, 脑子里要有明确的物理图像, 要明白为什么要这样安排这个实验、为什么要这样规定实验步骤; 动手实验前要先了解仪器的性能、规格、使用方法和操作规则, 不要在不清楚调整目的的情况下, 乱动仪器。调整仪器要仔细认真, 要注意观察实验现象, 明确每一步操作要达到的实验现象是什么样的, 观察实验现象是否与预期的一致, 想想这些现象是否合乎物理规律, 如果现象不符, 要仔细分析原因, 找出改进措施, 绝不能拼凑数据。如果实验中出现故障, 要学习排除故障的方法, 力求独立地排除故障。在数据记录时, 要正确地判断数据的科学性, 如实地、清楚地记录必要的环境条件、仪器型号与规格, 要一边测量, 一边及时地把全部原始数据记录在实验原始数据记录纸上的表格里, 记录时要注意: 实验中记录的每一个数据的位数都应符合有效数字的表述规范。

实验操作是物理实验的中心环节, 是学生主动研究、积极探索的好时机。实验中要多观察、多动手、多分析和多判断, 反对侥幸心理、机械地操作和盲目实验。实验时要把重点放在实验能力的培养上, 而不是测出几个数据就算完成任务。

实验完成后, 要将实验数据交给教师审查签字, 达到要求后, 再将实验仪器整理还原, 方可离开实验室。

3. 实验总结

实验后要及时整理实验资料, 写出实验报告。

1.3 实验报告

实验报告应是一份字迹清楚、文理通顺、图表正确、数据完备、结果明确的书面文件。

实验报告分为预习报告和课后报告两部分。

1. 预习报告的内容

(1) 实验名称。

(2) 实验目的。

(3) 实验原理。主要包括：简要的实验理论依据，实验方法，主要计算公式及公式中各量的物理意义，公式成立所应满足的实验条件，实验的电路图、光路图和实验装置示意图，有些实验还要求写出自拟的实验方案、设计的实验线路、选择的仪器等。

(4) 实验步骤。根据实际的实验过程写明实验的关键步骤和主要注意事项。

(5) 数据表格。

(6) 预习思考题。

预习报告在上课前交教师审阅，经教师认可后方可做实验。

2. 课后报告的内容

(1) 测量数据记录。记录中应有仪器编号、规格及完整的实验数据。

(2) 数据处理。在进行数据处理时，要认真学习实验数据处理的方法。计算时要有计算式，必要的中间过程，注意有效数字的应用；作图时要遵循作图规则，图线要规范、美观。要有根据、具体地进行实验误差分析；数据处理后要正确地表示出实验结果，并对结果做出合乎实际的说明。

(3) 小结或讨论。内容不限，可以是对实验中感兴趣实验现象的分析，可以是对实验中关键问题的研究体会，可以是对实验方法和实验装置的新建议，也可以解答思考题。

课后报告与预习报告构成一份完整的实验报告。

附录 规则物体密度的测定

一、实验目的

(1) 测量圆筒的密度。

(2) 学习天平、游标卡尺的使用。

(3) 学习不确定度的计算。

二、实验原理

单位体积内物体的质量称为物体的密度, ρ 为

$$\rho = \frac{M}{V}$$

式中 ρ ——物体的密度, kg/m^3 ;

M ——物体的质量, kg ;

V ——物体的体积, m^3 。

1. 圆筒的体积

圆筒如图 1.3.1 所示。圆筒体积 V 为

$$V = \frac{\pi}{4}(D^2H - d^2h)$$

式中 D ——圆筒外径, m ;

d ——圆筒内径, m ;

H ——圆筒高, m ;

h ——圆筒孔深, m 。

2. 圆筒密度

若已知圆筒的质量 M , 可得圆筒密度 ρ 为

$$\rho = \frac{M}{V}$$

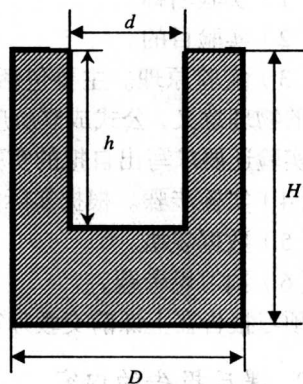


图 1.3.1

三、实验仪器

天平、游标卡尺、样品。

四、实验步骤

1. 测量圆筒的体积

用游标卡尺测量圆筒的外径 D 、内径 d 、高 H 、孔深 h 。每个量均在多个位置进行测量, 每个物理量均测量 10 次。将测量数据记录在表格里。

2. 用复称法测量圆筒质量

(1) 调整天平底盘水平, 横梁水平。

(2) 测量天平空载的零点位置 e_0 。

(3) 将圆筒分别放在天平的左右盘内, 各测量一次圆筒的质量 $M_{0\text{左}}$ 、 $M_{0\text{右}}$ 和零点值 $e_{\text{左}}$ 、 $e_{\text{右}}$ 。

(4) 分别在左盘和右盘加小砝码 ΔM , 测量零点值 $e'_{\text{左}}$ 、 $e'_{\text{右}}$, 计算分度值为

$$S_{\text{左}} = \frac{\Delta M}{|e'_{\text{左}} - e_{\text{左}}|}, \quad S_{\text{右}} = \frac{\Delta M}{|e'_{\text{右}} - e_{\text{右}}|}$$

根据 $M_{\text{左}} = M_{0\text{左}} - (e_{\text{左}} - e_0)S_{\text{左}}$ 和 $M_{\text{右}} = M_{0\text{右}} + (e_{\text{右}} - e_0)S_{\text{右}}$ ，由 $M = \sqrt{M_{\text{左}} \cdot M_{\text{右}}}$ ，得出圆筒的质量。

五、实验数据的记录与处理

圆筒密度的测量和计算。

(1) 圆筒体积的测量如表 1.3.1 所示。

表 1.3.1 数 据 表

次 数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	平均值	S
H (cm)	4.002	4.000	3.998	4.004	4.002	4.004	3.996	4.002	3.998	4.000	4.001	0.000 86
h (cm)	3.004	3.000	3.002	3.000	2.998	3.002	3.000	2.996	3.004	3.002	3.001	0.000 80
D (cm)	3.500	3.502	3.500	3.498	3.498	3.500	3.504	3.502	3.498	3.500	3.500	0.000 63
d (cm)	1.502	1.500	1.502	1.498	1.496	1.500	1.504	1.502	1.500	1.498	1.500	0.000 76

(2) 圆筒质量的测量如表 1.3.2 所示。

表 1.3.2 数 据 表

	$M_{\text{左}}$						$M_{\text{右}}$					
	a_1	a_2	a_3	b_1	b_2		a_1	a_2	a_3	b_1	b_2	
e_0	3.5	4.1	4.7	17.6	16.8	10.6	3.6	4.0	4.5	17.2	16.7	10.5
e	3.3	4.0	4.6	16.9	16.6	10.4	3.4	4.2	4.7	17.5	16.8	10.6
e'	3.2	4.1	4.7	17.2	16.9	10.5	3.5	4.2	4.8	16.9	16.6	10.5
	$M_{0\text{左}} = 258.890 \text{ (g)} \quad \Delta M = 10 \text{ (mg)}$ $S = 100 \text{ (mg/格)}$						$M_{0\text{右}} = 258.880 \text{ (g)} \quad \Delta M = 10 \text{ (mg)}$ $S = 100 \text{ (mg/格)}$					
	$M_{\text{左}} = 259.090 \text{ (g)}$						$M_{\text{右}} = 258.980 \text{ (g)}$					

(3) 圆筒体积的计算。

$$V = \frac{\pi}{4}(\bar{D}^2 \bar{H} - \bar{d}^2 \bar{h}) = \frac{\pi}{4}(3.500^2 \times 4.001 - 1.500^2 \times 3.001) = 33.191 \text{ (cm}^3\text{)}$$

(4) 圆筒体积不确定度的计算。

圆筒的外径 D 、内径 d 、高 H 、孔深 h 的 A 类标准不确定度为

$$u_{AD} = S_{\bar{D}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (D_i - \bar{D})^2}{n(n-1)}} = 0.000 63 \text{ (cm)}$$

$$u_{Ad} = S_{\bar{d}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (d_i - \bar{d})^2}{n(n-1)}} = 0.000 76 \text{ (cm)}$$

$$u_{AH} = S_{\bar{H}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (H_i - \bar{H})^2}{n(n-1)}} = 0.00086 \quad (\text{cm})$$

$$u_{Ah} = S_{\bar{h}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (h_i - \bar{h})^2}{n(n-1)}} = 0.00080 \quad (\text{cm})$$

游标卡尺的仪器误差限为

$$\Delta a = 0.002 \quad (\text{cm})$$

圆筒的外径 D 、内径 d 、高 H 、孔深 h 的 B 类标准不确定度为

$$u_{BD} = \frac{\Delta a}{\sqrt{3}} = 0.0012 \quad (\text{cm})$$

$$u_{Bd} = \frac{\Delta a}{\sqrt{3}} = 0.0012 \quad (\text{cm})$$

$$u_{BH} = \frac{\Delta a}{\sqrt{3}} = 0.0012 \quad (\text{cm})$$

$$u_{Bh} = \frac{\Delta a}{\sqrt{3}} = 0.0012 \quad (\text{cm})$$

圆筒的外径 D 、内径 d 、高 H 、孔深 h 的合成标准不确定度分别为

$$u_D = \sqrt{u_{AD}^2 + u_{BD}^2} = 0.0014 \quad (\text{cm})$$

$$u_d = \sqrt{u_{Ad}^2 + u_{Bd}^2} = 0.0014 \quad (\text{cm})$$

$$u_H = \sqrt{u_{AH}^2 + u_{BH}^2} = 0.0015 \quad (\text{cm})$$

$$u_h = \sqrt{u_{Ah}^2 + u_{Bh}^2} = 0.0014 \quad (\text{cm})$$

圆筒体积的标准不确定度为

$$u_V = \sqrt{\left(\frac{\partial V}{\partial D}\right)^2 u_D^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial d}\right)^2 u_d^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial H}\right)^2 u_H^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial h}\right)^2 u_h^2} = 0.0355 \quad (\text{cm}^3)$$

(5) 圆筒质量计算。

$$M = \sqrt{M_{\text{左}} \cdot M_{\text{右}}} = \sqrt{259.090 \times 258.980} = 259.035 \quad (\text{g})$$

(6) 天平测量精度很高，圆筒质量测量的不确定度计算较复杂，在这里取 $u_M = 0$ 。

(7) 圆筒密度的计算。

$$\rho = \frac{M}{V} = \frac{259.035}{33.191} = 7.8044 \quad (\text{g/cm}^3)$$

(8) 圆筒密度的标准不确定度的计算。

$$u_{\rho} = \sqrt{\left(\frac{\partial \rho}{\partial V}\right)^2 u_V^2 + \left(\frac{\partial \rho}{\partial M}\right)^2 u_M^2} = \sqrt{\left(\frac{\partial \rho}{\partial V}\right)^2} u_V = \frac{M}{V^2} u_V = 0.0083 \quad (\text{g/cm}^3)$$

六、实验结果

圆筒的密度为

$$\rho = \bar{\rho} \pm u_{\rho} = 7.8044 \pm 0.0083 \quad (\text{g/cm}^3) \quad (\text{概率 } P = 68\%)$$

第2章 误差理论的基础知识

本章介绍测量、误差的基本概念，误差估计的基本方法和实验结果的表示等内容。所介绍的都是初步知识，这些知识不仅在每一个物理实验中都要用到，而且是今后从事科研工作和工程应用必须了解和掌握的。这部分内容牵涉面较广，在开始实验前要用一定的学时，系统地讲解有关内容，使学生对相关内容有一个初步的了解。但是这些内容不可能在几次课的学习中就能掌握。学生要结合每一个具体实验仔细阅读有关内容，通过运用逐渐掌握。对实验误差的估计，本书只引用国家计量技术规范（JJG1027-91）中的相关结论，但对其理论不做详细的探讨和证明。

2.1 测量与误差

一、测量

物理学是一门实验科学，对它的研究离不开对物理量进行测量。测量是指为确定被测对象的量值而进行的一组操作。根据获得测量数据的方法的不同，测量可分为直接测量和间接测量两类。

1. 直接测量

把被测量量直接与标准量（量具或仪表）进行比较，直接读出测量结果，这样的测量就是直接测量，相应的物理量称为直接测量量。例如，用米尺测量长度、用温度计测量温度、用电压表测量电压等。直接测量是测量的基础。

2. 间接测量

对大多数物理量而言没有直接测量的量具或仪表，不能直接得到测量结果，但从理论上可以找到它与某些直接测量量的函数关系。测出直接测量量，根据函数关系，通过计算才能得到测量结果，这种测量称为间接测量，相应的物理量就是间接测量量。例如，小球体积 V 的测量，先测量出小球的直径 d ，通过公式 $V = \frac{1}{6}\pi d^3$ 计算出小球体积 V ，这就是间接测量。

这时体积 V 就是间接测量量。实际上，在物理实验中多数测量都是间接测量。

实验仪器不同、实验方法、实验条件的改变以及实验人员不同都会造成实验结果的变

化, 这样的测量是不等精度测量。而同样的仪器、同样的实验者用同样的实验方法, 在相同实验条件下对同一物理量进行的多次测量称为等精度测量。

二、物理量的基本单位和导出单位

物理量是由数值和单位两部分组成。不同的物理量有各自不同的单位。但由于各物理量之间并不是相互独立的, 许多物理量由物理定义和物理定律相联系, 因此只需要规定几个基本物理量单位, 其他物理量单位就可根据物理定义和物理定律推导出来。独立定义的单位称为基本单位, 相应的物理量称为基本物理量。由基本单位导出的单位称为导出单位。

在物理学的发展过程中, 使用过不同的单位制。各单位制选取的基本物理量和基本单位是不同的。多种单位制的并存使各国科技工作者伤透脑筋, 贻误了许多工作。1960年, 第十一届国际计量大会规定了用于一切计量领域的国际单位制(简称SI), 国际单位制规定了7个基本物理量单位, 它们是: 长度单位米(m), 时间单位秒(s), 质量单位千克(kg), 绝对温度单位开尔文(K), 电流单位安培(A), 发光强度单位坎德拉(cd), 物质的量单位摩尔(mol)。同时国际单位制中还规定了一系列配套的导出单位和通用词冠, 形成了一套严密、完整、科学的单位制。

1984年, 国务院规定以国际单位制为我国法定计量单位。

三、误差

实践证明, 测量结果都存在误差, 误差自始至终存在于一切科学实验和测量的过程中。在人身高的测量中, 由于作为比较标准的钢卷尺本身不准, 或难以读准卷尺毫米以下尾数, 或人的头顶和脚底两端不能和钢卷尺严格对齐, 或来自环境, 如温度对测量的影响, 或由于实验人员的操作水平等原因, 身高的实际值和测量结果并不完全一致, 存在误差。因此, 作为一个测量结果, 不仅要提供被测对象的量值大小和单位, 还要对量值本身的可靠程度做出判断。不知道可靠程度的测量值是没有意义的。分析测量中存在的各种误差, 尽量消除其影响, 对测量结果中不能消除的误差做出估计, 是物理实验和许多科研工作不可缺少的工作。

为了对测量及误差做进一步的讨论, 我们必须了解误差的概念、分类、特性, 产生的原因、消除方法和估算方法。

被测量量在其所处的确定条件下, 实际具有的量值称为被测量量的真值。

测量值与真值之差称为误差。一般表示为

$$\Delta N = N - A \quad (2.1.1)$$

式中 N ——测量给出的值;

A ——被测量量的真值;

ΔN ——测量误差, 又称绝对误差。

真值是客观存在的, 但它是一个理想的概念, 一般来说, 实验者对真值是不知道的。在实际测量中常用公认值作为真值, 或用已修正过的测量值的算术平均值来代替真值, 或用可靠性更高的仪器的测量结果作为真值, 这样的真值称为约定真值。

按照定义, 误差是测量结果与客观真值之差, 它既有大小又有方向(正负)。由于真值在绝大多数情况下无法知道, 因此误差也是未知的, 只能进行估计。

测量值与约定真值之差称为偏差，用它来估计误差。在多次测量的情况下，某次测量值与测量平均值之差就是该次测量值对平均值的偏差。在误差分析中，要经常计算这种偏差。

误差与真值之比称为相对误差。一般情况下，测量值与真值相差不会太大，故可以把误差与测量值之比作为相对误差，表示为

$$E = \frac{\Delta N}{N} \times 100\% \quad (2.1.2)$$

四、误差的分类

误差按其性质和表现形式可以分为三类：系统误差、随机误差和粗大误差。为便于理解，先看两个具体的例子。

例 1 用千分尺测量小球直径。由于制造等原因，千分尺存在 -0.002 mm 的零点误差。用该千分尺测量小球直径，测量结果与真值会产生定向的偏离。测量结果会比实际真值小 0.002 mm 。

例 2 用千分尺测量小球直径。尽管操作者进行了仔细测量，但由于人眼不能精确确定最小分度以下的读数以及来自环境、仪器等造成小球直径测量值有微小涨落，使测量结果呈现出某种随机起伏的特点。表 2.1.1 给出了小球直径测量的 10 个数据。

表 2.1.1 数 据 表

次 数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$D (\text{mm})$	3.152	3.151	3.150	3.149	3.155	3.154	3.156	3.152	3.153	3.150

我们把例 1 的误差称为系统误差，例 2 的误差称为随机误差。

1. 系统误差

在相同条件下，多次测量同一物理量，测量值对真值的偏离（大小和方向）总是相同的或遵循一定的变化规律，这类误差称为系统误差。

系统误差的特点是它的确定规律性。这种规律性可以表现为定值的，如千分尺零点不准造成的误差；可以表现为累积的，如用受热膨胀的钢尺进行测量，其指示值将小于真实长度，误差随待测长度成比例增加；也可以表现为周期性规律的，如分光计中刻度盘与指针转动中心不重合造成的偏心差；还有一些系统误差可以表现为其他复杂规律。系统误差的确定性反映在：测量条件一经确定，误差也随之确定。因此，在相同实验条件下，多次重复测量不可能消除系统误差。

原则上，系统误差应予以修正，但系统误差的发现和估计，常取决于实验者的经验和判断能力。在处理系统误差时，常将系统误差分为两类来处理：一类是大小和符号均已确定的系统误差，称为可定系统误差；一类是大小和符号尚未确定的系统误差，称为未定系统误差。对可定系统误差在测量结果中要进行修正，消除这类系统误差；对未定系统误差只能对其进行估计，一般将它计算在不确定度中。

2. 随机误差

在实际测量条件下，多次测量同一物理量时，由于偶然的不确定因素造成每次测量值

的无规则涨落, 测量值对真值的偏离时大时小, 时正时负, 不能由上一次测量值来估计下一次测量值的大小, 这类误差称为随机误差。

随机误差的特点是具有随机性。在相同条件下, 每个测量结果的误差是不确定的, 如表 2.1.1 给出的小球直径测量结果那样, 显示测量值没有确定的规律性; 但当测量次数足够大时, 可以发现大量的测量值服从统计规律。随机误差的这种特点使我们能够在确定条件下, 通过多次重复测量来发现它, 而且可以用相应的统计规律来讨论它对测量结果的影响。

系统误差和随机误差是两种不同性质的误差, 但它们又有着内在的联系, 它们的区别不是绝对的。在一定的实验条件下, 它们有自己的内涵和界限, 但当条件改变时, 彼此又可能互相转化。例如, 直尺的长度误差, 对生产厂家而言, 它是随机误差; 对使用者而言, 它又是系统误差。又如小球直径的不均匀性, 对球上某个确定位置, 直径对准确值的偏差是确定的, 当对于球面上的不同位置而言, 直径对准确值的偏差又有随机性。许多情况是系统误差和随机误差混在一起, 难以严格区分。如测量者用直尺测量钢丝的长度, 估读误差往往既包括系统误差又包括随机误差。这里的系统误差是指测量者读数时总有偏大或偏小的倾向, 随机误差是指测量者每次读数时偏大或偏小的程度又互不相同, 是随机的。

3. 粗大误差

由于测量系统偶然偏离所规定的测量条件、仪器损坏、设计错误、操作不当或在记录、计算数据时出现失误而产生的明显偏离实验结果的误差, 称为粗大误差, 简称粗差。对这种数据应当予以剔除。需要指出的是, 不应当把有某种异常的观测值都作为粗大误差来处理, 因为它可能是数据中固有的随机性的极端情况。判断一个观测值是否为异常值, 通常应根据技术上或物理上的理由直接做出决定, 当原因不明确时, 可用统计方法处理。

五、精密度、正确度和准确度

习惯上人们经常用“精度”一类的词来形容测量结果的误差大小。为此, 我们对有关名词从误差角度做必要的说明。

精密度: 表示多次测量时, 测量值的集中程度, 它是测量值的随机误差大小的量度。与测量值的系统误差无关。

正确度: 表示测量值与真值符合的程度, 它是测量值的系统误差大小的量度。与测量值的随机误差无关。

准确度: 是对测量数据精密度和正确度的综合评定。表示测量值与被测量真值之间的一致程度。准确度又称精确度。

作为一种形象的说明, 可以参照图 2.1.1 来帮助理解上述三个概念。

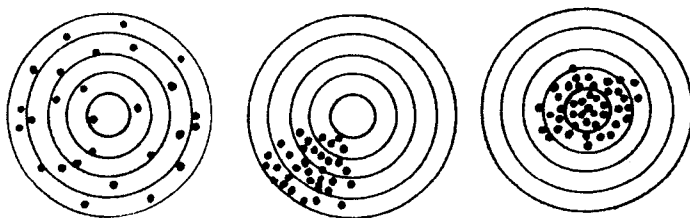


图 2.1.1