



21世纪高等学校规划教材

物理实验与实训

鲁 刚 主编

W U L I
S H I Y A N Y U S H I X U N



北京邮电大学出版社
www.buptpress.com



21 世纪高等学校规划教材

物理实验与实训

鲁 刚 主编

北京邮电大学出版社

• 北京 •

内 容 提 要

本书分两部分共编排了 46 个实验项目和 6 个实训项目,涵盖力、热、声、光、电磁、量子和物理学的应用等内容,既有培养学生基本方法、提高学生技能的基础性实验项目,又有开阔学生视野、发挥学生潜能的综合性与设计性实验项目,还有培养和提高学生职业意识和动手能力,以及完成简单产品的加工、组装与测试的实训项目。每个项目开头介绍一些背景知识,便于学生理解有关概念和方法,有助于提高他们对物理实验与实训的兴趣和热情。

本书可作为高等院校理工科类专业的大学物理实验与实训教材,也可供高等职业技术学院工科学生使用,还可作为实验教学和技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

物理实验与实训/鲁刚主编. — 北京:北京邮电大学出版社,2012.1(2014.12 重印)

ISBN 978-7-5635-2901-8

I. ①物… II. ①鲁… III. ①物理学—实验—高等学校—教学参考资料 IV. ①O4-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 005748 号

-
- | | |
|-------|---|
| 书 名 | 物理实验与实训 |
| 主 编 | 鲁 刚 |
| 策 划 人 | 刘国辉 马子茗 |
| 责任编辑 | 张雪祥 |
| 出版发行 | 北京邮电大学出版社 |
| 社 址 | 北京市海淀区西土城路 10 号(100876) |
| 电话传真 | 电话:010-82333010 62282185(发行部) 010-82333009 62283578(传真) |
| 网 址 | www.buptpress3.com |
| 电子信箱 | ctrd@buptpress.com |
| 经 销 | 各地新华书店 |
| 印 刷 | 北京联兴华印刷厂 |
| 开 本 | 787 mm×1 092 mm 1/16 |
| 印 张 | 14.5 |
| 字 数 | 357 千字 |
| 版 次 | 2012 年 1 月第 1 版 2014 年 12 月第 4 次印刷 |
-

ISBN 978-7-5635-2901-8

定 价:32.00 元

• 如有印装质量问题,请与北京邮电大学出版社发行部联系 •

前 言

大学物理实验课是高等理工科院校的一门独立的必修基础课程,是理工科学生入学后接受系统实验训练的开端。通过这门课程的学习,使学生在实验的基本理论、方法和技能等方面受到系统而严格的训练,不断提高实验技能 and 创新能力。

本书分两部分由浅入深地编排实验和实训内容。每个项目开头介绍一些背景知识,这些内容可以帮助学生理解有关概念和方法,激发学生对物理实验的兴趣和热情。

本书共分为6章。第1章为物理实验基础知识,包括绪论和数据处理等内容;第2章为预备性实验,共11个项目,目的是弥补中学物理实验的缺陷,为后续实验打下良好基础,起到承上启下的作用;第3章为基础性实验,安排15个项目,通过这些实验,使学生在观察、分析和对物理量的测量中学习实验的基本方法和技能,了解科学实验的基本方法与特点,培养学生的独立动手能力;第4章为综合性实验,共10个项目,目的是巩固学生在基础性实验阶段的学习成果,开阔学生的视野,提高学生对实验方法和实验技能的综合运用能力;第5章是设计性实验,共有10个项目,一般由实验室给出实验要求和实验条件,由学生自己拟定实验方案并独立完成实验,以发挥学生的最大潜能;第6章为物理实训,共6个项目,通过简单产品的加工、组装与测试,使学生了解工程技术的一般过程,培养学生的职业岗位意识和综合运用能力。附录部分有3项内容,附录1为“用MS Excel绘制实验曲线”,用实例介绍了用MS Excel的图表功能绘制实验曲线的方法;附录2为“物理实验报告模板”,以帮助并规范学生撰写实验报告;附录3为“物理实验练习题”,帮助学生复习和巩固学过的物理实验基础理论等内容。

本书凝聚了沈阳工业大学基础部物理实验教学中心全体教师多年教学的智慧和成果。参加本次教材编写的教师有:鲁刚、杨松、李玉洁、樊柏村、李纪树、王智勇、陆大伟、刘扬、孙旻、李欣、杨艳、谷玉亭、王莉、杨全成、李云飞、姜翠、王振军等。本书借鉴了相关文献,并参阅了兄弟院校的部分资料,在此深表感谢。

因编者水平有限,书中难免有错误和疏漏之处,诚请广大读者不吝指正。

编 者

2011年11月

目 录

第 1 章 物理实验基础知识	1
1.1 绪论	1
1.1.1 物理实验课的作用	1
1.1.2 物理实验课的目的	2
1.1.3 物理实验课的要求	2
1.1.4 物理实验基本规则	3
1.2 数据处理	4
1.2.1 测量及其分类	5
1.2.2 误差理论	5
1.2.3 系统误差	6
1.2.4 随机误差	8
1.2.5 误差估算	9
1.2.6 测量结果的表示	10
1.2.7 有效数字	12
1.2.8 数据处理的基本方法	13
第 2 章 预备性实验	20
2.1 仪器设置	20
2.2 长度测量	22
2.3 固体密度测量	26
2.4 单摆研究	30
2.5 变温曲线测绘	32
2.6 气体定律	36
2.7 电表的使用	38
2.8 电路的连接与控制	44
2.9 伏安法测电阻	48
2.10 薄透镜成像	51
2.11 随机现象研究	55
第 3 章 基础性实验	58
3.1 杨氏模量测量	58

2 物理实验与实训

3.2 转动惯量测量	63
3.3 焦利称实验	67
3.4 液体黏度测量	70
3.5 空气摩尔热容比测定	73
3.6 固体线胀系数测量	76
3.7 模拟法测绘静电场	80
3.8 电桥法测电阻	84
3.9 示波器的使用	89
3.10 电位差计的使用	96
3.11 铁磁材料磁滞研究	101
3.12 等厚干涉	106
3.13 棱镜折射率测定	110
3.14 光栅衍射	116
3.15 迈克耳孙干涉仪	119
第4章 综合性实验	126
4.1 声速测量	126
4.2 温度传感器特性研究	131
4.3 热管基本特性研究	138
4.4 霍耳效应	142
4.5 油滴实验	147
4.6 弗兰克-赫兹实验	151
4.7 光电效应	155
4.8 光电池基本特性研究	159
4.9 微波模拟实验	165
4.10 光纤信号传输	171
第5章 设计性实验	176
5.1 设计性实验的性质与特点	176
5.1.1 科学实验的一般过程	176
5.1.2 设计性实验的特点	176
5.2 实验方案的选择	177
5.2.1 实验方法的选择	177
5.2.2 测量方法的选择	177
5.2.3 测量仪器的选配	177
5.2.4 测量条件的选择	178
5.2.5 数据处理方法的选择	178
5.3 误差与仪器选配	179
5.4 重力加速度研究	180
5.5 简谐振动研究	181

5.6	电阻率测量	181
5.7	变阻器的使用	182
5.8	电学元件伏安特性研究	183
5.9	用电位差计校准电表	184
5.10	电表的改装与校准	185
5.11	RC 电路暂态过程研究	186
5.12	光栅特性研究	188
第 6 章 物理实训		190
6.1	物理天平的拆装	190
6.2	望远镜的组装	192
6.3	显微镜的组装	194
6.4	电阻温度计制作	197
6.5	微型电源适配器制作	200
6.6	半导体制冷技术	202
附录		206
附录 1 用 MS Excel 绘制实验曲线		206
附录 2 物理实验报告模板		209
附录 3 物理实验练习题		215
参考文献		223

第 1 章 物理实验基础知识

在物理实验课程学习中,学生应根据每一个实验的目的与要求,按照实验原理和内容进行实验,测量物理量的数值,从中学习具体的实验方法和技能。通过一系列不同层次实验的系统而严格的训练,不断提高自身的实验能力。

如何在实验中仔细观察现象、规范使用仪器、记录实验数据、正确处理数据并独立撰写实验报告等内容是学生必须掌握的实验基础知识。本章的绪论和数据处理两节,要求学生在实验操作前修读,并伴随物理实验课的进程,逐步深入地学习。

1.1 绪 论

1.1.1 物理实验课的作用

物理学是一门定量化的实验科学。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,在实验思想、实验方法以及实验手段等方面是各学科科学实验的基础。

物理实验课是高等学校理工科类专业对学生进行科学实验基本训练的必修基础课程,是本科生接受系统实验方法和实验技能训练的开端。

物理实验课覆盖面广,具有丰富的实验思想、方法、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。

在物理学发展过程中,实验起着决定性的作用。从研究物理现象,寻找物理规律,到建立物理定律并予以验证,都离不开实验。

伽利略的斜面实验使他用“对接斜面”的理想实验,提出了惯性定理。焦耳通过大量精确的实验结果论证了机械能和电能与热能之间的转化关系,他测定的热功当量的一致性,为能量守恒定律奠定了不可动摇的基础。库仑用扭称精密测定电力的实验,开始了电磁学的定量研究。牛顿的万有引力定律的正确性被海王星的发现和哈雷彗星的准确观测等实验所证明,而他关于光的微粒学说却被托马斯·杨的双缝干涉实验所否定。

经典物理学的基本定律几乎都是实验结果的总结与推广,并且经过实验的检验。

进入 20 世纪,一些实验现象与经典物理学相悖,特别是“两朵乌云”和“三大发现”。前者指的是黑体辐射和迈克耳孙-莫雷实验;后者指 X 光、放射性和电子的发现。由于用经典物理学难以解释上述现象,导致了现代物理学两大支柱理论——相对论和量子力学的建立。尽管相对论和量子力学主要是由理论物理学家所创立,不过这两个理论的正确性却是经过实验检

验的。在相对论和量子力学建立以后,大量实验证实了它们的正确性。

物理实验不仅对于物理学的研究工作非常重要,对于物理学在其他学科和各个工程领域的应用也十分重要。当代物理学的发展使整个世界发生了惊人的变化,而这些变化正是物理学在各个学科和工程领域应用的结果。

以物理学为基础或建立在物理学应用基础上的工程学科有电工学、热工学、无线电电子学等。许多新材料的发现及其制备方法,都离不开物理学的应用。在化学领域,从物理化学、光谱分析到量子化学,从放射性测量到激光分离同位素,皆是物理学的应用。在生物学发展过程中,更离不开各类显微镜的贡献;生命科学同样离不开物理学的应用,DNA 的双螺旋结构是由美国生物学家沃森和英国物理学家克里克共同建立并为 X 光衍射实验所证实。在医学方面,从 X 光透视、B 超诊断、CT 诊断、核磁共振诊断到各种理疗手段,包括放射性治疗、激光治疗、 γ 刀等都是物理学的应用。

物理学正在渗透到各个学科领域,这种渗透无不与实验密切相关。显然,实验是物理理论应用到其他学科的桥梁和纽带,只有掌握物理实验的基础理论和基本技能,才能顺利地将物理学原理应用到其他学科和工程技术中。

1.1.2 物理实验课的目的

在物理实验教学中,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,使学生初步掌握实验科学的思想和方法。培养学生的科学思维和创新意识,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。

同时,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,积极主动的探索精神,遵守纪律,团结协作,爱护公物的优良品德。

1.1.3 物理实验课的要求

掌握基本物理量的测量方法、常用仪器的性能与使用方法和基本的实验操作技术,学会常用的物理实验方法、测量误差的基础知识和实验数据的处理方法。

具有独立的实验能力,即通过阅读实验教材,掌握实验原理,规范使用仪器,准确记录数据并正确处理数据,客观分析实验结果,独立撰写实验报告的能力。

一堂物理实验课包括:课前预习,实验操作与记录,撰写实验报告。

1.1.3.1 课前预习

详细了解实验室的各项规章制度和相关实验的注意事项。

仔细阅读实验教材及相关文献,了解实验目的与要求、实验原理与方法、实验仪器的性能与操作规程等,然后用自己的语言写好预习报告。预习报告内容大致包括:

- ① 实验报告封面信息。
- ② 实验目的——应学会的实验方法或预期的实验结果。
- ③ 实验原理——简要的实验理论和方法,必要的实验装置示意图,注意事项等。
- ④ 实验仪器——实验用到的主要仪器、量具、元器件等(应到实验室后填写)。
- ⑤ 实验步骤——实验的关键步骤和注意要点。
- ⑥ 实验表格——依据实验要求设计、用于记录原始数据的表格。

1.1.3.2 实验操作与记录

- ① 学生进入实验室后,应按要求签名,并根据分组情况找到自己的位置。

- ② 进一步了解所用仪器的操作规程、使用方法和注意事项。
- ③ 按实验内容和要求,合理布置实验仪器,包括电路连接、光路布置等。
- ④ 请指导教师检查实验仪器布置情况,符合要求后进行下一步。
- ⑤ 对各个仪器进行零点调节或校准。
- ⑥ 测量第一个数据后,请教师检查,合格后进行下一步。
- ⑦ 按照实验要求,依次测量其余数据,将数据正确记录到数据表格内。
- ⑧ 实验数据测取完毕后,请指导教师审阅数据。
- ⑨ 数据经指导教师审阅签字后,整理还原仪器,并将实验凳归位。

1.1.3.3 实验报告

实验报告应在预习报告基础上续写。

实验报告应依据数据处理方法与要求,进行数值和误差计算,正确表达实验结果,对实验结果进行分析、讨论,给出合理的评价,并进行实验总结。实验报告内容包括:

- ① 实验目的——应学会的实验方法或预期的实验结果。
- ② 实验原理——简要的实验理论和方法,必要的实验装置示意图,注意事项等。
- ③ 实验仪器——实验用到的主要仪器、量具、元器件等。
- ④ 实验步骤——实验的关键步骤和注意要点。
- ⑤ 实验数据——未经改动、完整并经指导教师签字的原始记录。
- ⑥ 数据处理——计算公式及简要计算过程,误差计算,作图,实验结果的表达。
- ⑦ 分析讨论——对误差的评定,对实验结果的分析与讨论。
- ⑧ 实验总结——对实验的分析、评价、体会和建议等。

1.1.4 物理实验基本规则

在物理实验中,每一个项目都有其要求和操作规则,可在实验过程中逐一学习。其中电磁学实验和光学实验有些一般性的要求和实验规则需要事先了解和掌握。

1.1.4.1 电磁学实验基本规则

电磁学实验要在保证人身安全的前提下进行,应特别注意:连接线路和拆线必须在断电状态下进行;操作时不能触及高压带电部位;尽量用单手操作。

① 仪器布置。

参照电路图,将需要操作的仪器放在近处,需要读数的仪表置于眼前,并根据布线合理、操作方便、实验安全、检查容易的原则布置仪器。

② 电路连接。

按照回路接线法连接线路。将电路分解为若干单元回路,接线时沿着单元回路,从电源正极开始,依次首尾相连,最后仍然回到起始点。按照同样方法,再从已连接好的单元回路的高电位开始连接下一个单元回路。这样一个回路、一个回路地连接线路,直至完毕。

③ 设置检查。

连接好线路后,要检查线路是否正确、仪器是否设置在安全状态。比如电流表和电压表是否置于所需量程、变阻器的滑动端(或电阻箱旋钮)是否处于安全位置等。线路自检并仪器安全设置后,应请指导教师复查,合格后方能通电试验。

④ 通电试验。

用跃接法通电试验。瞬间接通电源,及时观察仪器、仪表的反应。如果发现表针反向偏

转、超出量程、线路打火或特殊声音等异常现象时,应立即断电,重新检查,排除故障后方可继续试验。只有情况正常,才能进行实验。

⑤ 上电实验。

在电路正常的情况下,开启电源开关,上电实验。按照仪器或电表的操作规程、使用方法和注意事项进行操作。调节仪器时,从其安全位置或安全状态开始。根据实验步骤,逐一测量数据。操作过程中应始终保证人身安全,并使仪器保持在安全状态下工作。

⑥ 断电整理。

实验结束后,不要急于拆线。应先检查数据是否合理,并经教师检查,确认无误后,方可拆线。拆线前应先将分压器和限流器调至安全位置,然后切断电源开关。拆线时应从电源开始,依次拆除其他仪器。最后将导线整理好,仪器归整、复原。

1.1.4.2 光学实验基本规则

光学仪器的主要部件是光学元件,它们多数是用光学玻璃制成的,其光学表面经过仔细研磨和抛光,有些还镀有薄膜。它们的机械性能和化学性能不是太好,若使用不当,则会降低其光学性能,甚至损坏报废。

① 必须在了解仪器和光学元件的操作规程与使用方法后再使用它们,并要轻拿、缓放。

② 不能使仪器或光学元件受到震动或冲击,更要防止脱手落地。

③ 切勿用手触及元件的光学表面。取、放光学元件时,只可接触其磨砂面,比如棱镜的上下底面、光栅与透镜的边缘等(图 1.1)。

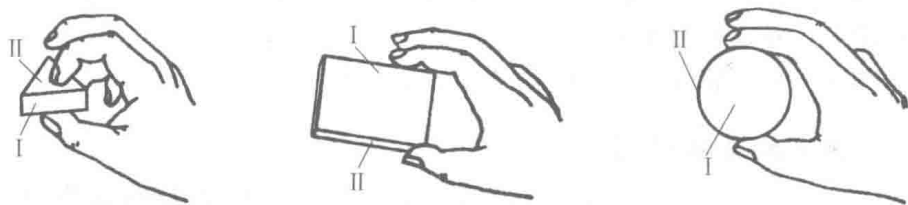


图 1.1 手持光学元件的方式

④ 勿对着光学元件说话、打喷嚏,以免污染它们。

⑤ 调节光学仪器时,应耐心细致,边观察边调节,动作要轻、慢、匀、稳,严禁盲目操作与粗鲁行事。

⑥ 光学表面若有灰尘,可用橡胶球吹掉或用干燥脱脂棉轻轻拭去。

⑦ 光学表面倘有轻微污痕,可用镜头纸轻轻拂去,不可用普通纸、手帕、衣角或袖口等擦拭。若光学表面有严重污痕,应由实验室人员处理。

⑧ 仪器和元件用毕,应及时放回原处,防止被污染。

1.2 数据处理

测量误差、数值计算和测量结果的表示等数据处理方法不仅在物理实验中需要,在其他学科实验中也会用到。这些内容包括记录实验数据、数值与误差计算、测量结果的表示,以及列表法、作图法、逐差法和最小二乘法等知识。

数据处理是物理实验课的重要基础知识,需要认真阅读实验教材和相关文献,结合具体实验项目的学习,逐渐掌握。

1.2.1 测量及其分类

测量是指用仪器、量具等手段确定被研究量数值的过程。测量是一个比较过程,即将被研究量与标准量进行比较,其倍数就是被研究量的**测量值**。测量值应包括测量数值和相应的单位,如 36.0 s, 3.35 m, 4.500 kg, 等等。

1.2.1.1 直接测量与间接测量

依据获得测量值的途径或方法,可将测量分为直接测量和间接测量。

使用仪器或量具等手段直接读取被测量数值的过程称为**直接测量**,如用米尺测量长度,用天平称衡质量等。

在物理实验中,大多数物理量的测量是通过直接测量值与其存在某种函数关系而得到的。比如测量圆柱体的体积,可通过测量圆柱体的直径 D 和高 H ,根据公式 $V=\pi D^2 H/4$ 计算得到。这种测量叫做**间接测量**。

直接测量与间接测量不仅取决于被测量本身,还决定于实验仪器。比如,测量一个电器的电功率,用电流表和电压表测量就是间接测量,用功率表测量就是直接测量。

1.2.1.2 等精度测量与非等精度测量

根据测量条件是否相同,可将测量分为等精度测量与非等精度测量。

如果对某物理量重复测量多次,各次测量条件相同,即环境、仪器、测量者等均相同,无法判别其中哪一次测量优于其他次测量;或者在间接测量中,测量各个直接测量量的**准确程度**相同,这样的测量称为**等精度测量**。

为了更精确的测量,通常在科学研究或高精度测量中,对某物理量往往用不同的测量方法,不同的仪器,不同测量次数,由不同测量者进行测量与比较,这样的测量叫做**非等精度测量**。比如,用不同的方法测量光速。

物理实验课所涉及的测量绝大多数属于等精度测量。

1.2.2 误差理论

1.2.2.1 误差概念

在任何测量中,被测量都存在着由自身性质所规定的确定数值,称为**真值**。由于种种原因,实际测量的数值——**测量值**,只能是真值的一个近似值,它与真值永远存在着一定的差值,这个差值叫做**误差**,也叫**绝对误差**。

多数情况下,真值是未知的,从而误差也是未知的。通常用**约定真值**代替真值,约定真值包括一次测量的测量值,多次测量的算术平均值等。

若用 A 、 x 和 Δx 分别表示约定真值、测量值和误差,则它们之间的关系为

$$\Delta x = x - A \quad (1.1)$$

对同一个物理量来说,绝对误差越小,测量越准确。而对不同的物理量而言,单凭绝对误差不能判断测量的准确程度。例如,由实验测量得到时间和重力加速度两个测量结果分别为 $t=(100.31\pm0.05)$ s 和 $g=(9.81\pm0.01)$ m/s²,它们中哪个量测得更准确呢?显然,由绝对误差不能回答这个问题。

准确度是测量结果与被测量真值之间的一致程度,通常用**相对误差**表示测量的准确度。

绝对误差 Δx 与约定真值 A 的比值,叫做**相对误差**,一般表示为百分误差形式

$$E_x = \frac{\Delta x}{A} \times 100\% \quad (1.2)$$

相对误差越小,测量越准确。在上例中, $\Delta t/t=0.05\% < \Delta g/g=0.1\%$,可见时间 t 比加速度 g 测得准确。相对误差是测量准确度的数值表示。

1.2.2.2 电表准确度等级

根据中国国家标准,对单向标尺电表以最大引用误差表示电表的基本误差,并以电表的基本误差确定电表的准确度等级。若以 a 表示电表的准确度等级, $\Delta_{\text{仪}}$ 表示电表的_{最大示值误差}, N_m 表示电表的量程,则有

$$a\% = \frac{\Delta_{\text{仪}}}{N_m} \times 100\% \quad (1.3)$$

目前我国生产的指示电表,其准确度等级分为七级,即 0.1、0.2、0.5、1.0、1.5、2.5、5.0 级。准确度等级的数值越小,对应的基本误差越小。

由电表的准确度等级 a ,可判断电表读数对测量结果的影响。例如,用一个电流表测量电流强度,电表准确度等级为 0.5,量程为 10 mA,测量读数为 5 mA,求电表对测量结果影响的误差 ΔI 。由式(1.3),其绝对误差为

$$\Delta I = \Delta_{\text{仪}} = I_m \times a\% = 10 \text{ mA} \times 0.5\% = 0.05 \text{ mA}$$

相对误差 ΔE 为

$$E_I = \frac{\Delta I}{I} \times 100\% = \frac{0.05 \text{ mA}}{5 \text{ mA}} = 1\%$$

电表的准确度等级对测量结果影响很大,只有待测量接近满量程时,影响较小。因此应根据被测量大小、电表的量程和准确度等级,合理选择电表,而不能片面地认为电表的准确度等级愈高愈好。

比如,用 0.5 级、0~6 V 电压表测量 1 V 电压时

$$E_U = \frac{\Delta_U}{U} = \frac{U_m}{U} \times a\% = \frac{6}{1} \times 0.5\% = 3.0\%$$

用 1.0 级、0~3 V 电压表测量 1 V 电压时

$$E_{U'} = \frac{\Delta_{U'}}{U'} = \frac{U'_m}{U'} \times a'\% = \frac{3}{1} \times 1.0\% = 3.0\%$$

可见,若量程选择合适,用 1.0 级电表测量比用 0.5 级电表测量要准确。

引起误差的因素包括实验方法、仪器缺陷、环境影响、人的感官不完善和一些未知因素等。根据误差的来源和性质,可将误差分为系统误差与随机误差两大类。

1.2.3 系统误差

系统误差是由实验系统的不完善引起的,它或是不变的,或是按一定规律变化的。根据系统误差的性质可将其分为定值系统误差与变值系统误差两类;若按照系统误差的可确定性划分,系统误差又可分为可定系统误差与未定系统误差。

1.2.3.1 定值系统误差

在测量过程中,大小和符号保持不变的系统误差,如图 1.2 中的曲线 a。比如,分析天平用的三等砝码,按国家规定 50 g 砝码允许有 $\pm 2 \text{ mg}$ 的极限误差。若该砝码实际值为 50.002 g,生产厂可作为合格品出厂,由此引入了系统误差为 2 mg。这类系统误差,可经高一级仪器校验后,定出其误差值,在测量中加以修正。

1.2.3.2 变值系统误差

在测量条件变化时,按一定规律变化的系统误差如图 1.2 中的曲线 b、c。例如,在图 1.3 中,用电位差计测量电动势 E_x 时,先用标准电阻 R_s 上的电压去补偿标准电池的电动势 E_s ;再用 R_x 上的电压去补偿待测电动势 E_x ,前后两次检流计 G 中电流均为零时,有

$$\frac{E_x}{E_s} = \frac{R_x}{R_s}$$

上式成立的条件是工作电流 I_0 保持不变。实际上工作回路中电池 E 的电压随使用时间而降低,即 I_0 随时间变化,如图 1.4 所示,在 $t_2 \sim t_3$ 范围内 $E_x/E_s = R_x/R_s$ 成立,而在 $t_1 \sim t_2$ 和 $t_3 \sim t_4$ 范围内,将带来非线性系统误差。

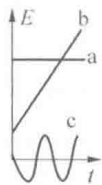


图 1.2 系统误差

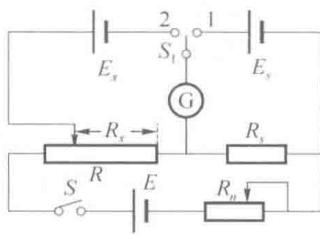


图 1.3 电位差计电路

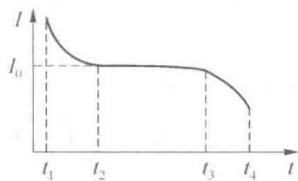


图 1.4 $I \sim t$ 曲线

1.2.3.3 可定系统误差

能确定大小和符号、并可予以消除或修正的误差。如上述提及的三等砝码,若经高一级天平校验后,即可确定其系统误差,并可修正测量值。对于绝大多数可定系统误差,应该对其进行修正,例如用修正值、修正公式、校准曲线等修正测量值。

1.2.3.4 未定系统误差

在测量过程中不能确定其大小和符号的误差。在数据处理中,常用估计误差限的方法确定,并用统计方法予以处理。例如,一个 0.5 级的电流表,最大示值误差为 $\Delta I = \text{量程} \times 0.5/100$,即属于未定系统误差。其意义为指针在任何刻度处的示值误差不会超过 ΔI ,而指针在不同位置处究竟系统误差多大是不确定的。

对于一些未定系统误差,只要清楚其存在的因素,便可以采取相应的措施予以减小或消除,如交换测量法、对称测量法、正反向测量法等。

1.2.3.5 消除系统误差的方法

消除系统误差的途径,就是在测量中设法抵消它,减小它,或予以修正。

实际上,任何仪器都是有缺陷的,任何理论模型也是实际情况的近似描述。因此,对系统误差作修正也只能是一种比较接近实际的修正,不能绝对地消除。通常所谓的消除系统误差的影响,是指把它的影响减小到随机误差之下。

在数据处理中,对于可定系统误差,应在确定其误差值后,对结果进行修正。对未定系统误差,则应确定其误差限(最大误差)与随机误差一起作统计合成处理。以下介绍几种消除系统误差的方法。

① 消除系统误差产生的根源。

从理论方法、仪器装置、环境条件和操作者等方面仔细分析,对可能引起系统误差的各种因素加以处理,消除其产生的根源。例如,在“杨氏模量测量”和“简谐振动研究”实验中,钢丝的自然状态几乎均非完全拉直,可增加起始载荷来消除这类误差。

② 改进测量原理和方法。

例如,用天平称衡质量时,采用**复称法**消除天平不等臂引起的误差(实验 2.3);在测定棱镜折射率时,采用**对径读数法**来消除分光计度盘的偏心差(实验 3.13);用电桥测量电阻时,先接入待测电阻使电桥达到平衡,然后用标准电阻箱替换待测电阻,调节标准电阻箱使电桥再次平衡,则待测电阻值等于标准电阻箱的示值,这种方法称为**替换法**。

③ 理论公式修正法。

例如,由伏安法测电阻,可按以下公式给予修正:电流表内接 $R=U/I-R_A$;电流表外接 $R=U/(I-U/R_V)$ 。又如,在“焦利称”实验中,周期的修正公式为

$$T=2\pi\sqrt{\frac{m+m_e}{k}}$$

式中, m_e 为弹簧的有效质量, $m_e=pm_0$; p 为待定系数; m_0 为弹簧本身的质量。

④ 系统误差的随机化。

对某些系统误差,可在均匀改变测量条件下作多次测量,然后取测量值的平均值来消除。例如,在圆柱或金属丝的不同截面、不同方位测量直径,可部分抵偿因材质和加工等因素造成的直径不均匀或形状不规则带来的微小误差。用分光计测量角度,应在度盘不同位置上进行测量,也是这个道理。

还有一些系统误差,既不能修正,也不能消除,需要合理估算。在计算不确定度时,作为不确定度的一个分量,按照一定方式与不确定度的其他分量合成。

1.2.4 随机误差

实际上,即使不考虑系统误差,也还存在着一定的误差,它们是由一些独立因素引起的,是必然存在的,其特点是多次测量结果偏大与偏小不确定,这种误差叫做**随机误差**。如仪器示值的微小变化等引起的误差。

就单次测量而言,随机误差表现为偶然的,没有规律性,其大小和方向都不能预知。但对同一物理量进行多次等精度测量,随机误差服从一定的统计分布规律。常见的一种分布叫正态分布,如图 1.5 所示。图中横坐标为测量值 x ,纵坐标为概率密度函数 $p(x)$, σ_x 为标准偏差。通过对正态分布曲线的分析可知,随机误差具有以下特点:

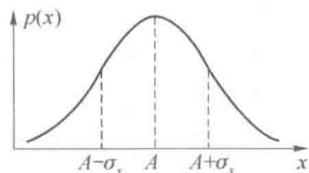


图 1.5 正态分布曲线

① 有界性。所有测量值分布在一定范围内,过大或过小的测量值不会出现,即过大的正误差或负误差出现的机会趋近于零。

② 单峰性。曲线在约定真值附近出现峰值,表明靠近约定真值的测量值出现的机会多,远离约定真值的测量值出现的机会少。

③ 对称性。曲线近似以通过约定真值,且平行于纵轴的直线对称,即绝对值相等的正、负误差出现的机会相等。

对同一个物理量进行多次等精度测量,一般用多次测量值的算术平均值代替约定真值,用标准偏差表示随机误差。

对某物理量 x 等精度测量 n 次,得到一组测量值 $x_1, x_2, \dots, x_n$, 其算术平均值为

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (1.4)$$

每次测量值 x_i 与算术平均值 $\bar{x}$ 之差叫做残差,即

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

用统计方法对残差进行处理,得标准偏差 σ_x 为

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{\sum (\Delta x_i)^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (1.5)$$

标准偏差大,随机误差就大,表示测量值比较分散;标准偏差小,随机误差就小,表示测量值比较集中。

系统误差与随机误差是两类性质不同的误差,在一定条件下,它们各有其内涵和界限。但当条件改变时,彼此又可能相互转化。例如,由于温度变化造成的误差,在短时间内可以视为系统误差,而在长时间内则宜作随机误差处理。

1.2.5 误差估算

1.2.5.1 多次直接测量的误差估算

在不考虑系统误差时,一般由多次测量值的算术平均值表示约定真值。算术平均值和标准偏差分别由式(1.4)和式(1.5)表示。

若同时存在系统误差和随机误差,可按“方和根”合成误差,表示为

$$\Delta_{\text{总}}^2 = \sigma_x^2 + \Delta_x^2 \quad (1.6)$$

1.2.5.2 单次直接测量的误差估计

有时对物理量多次测量是不可能的,比如测量一个逐渐冷却的物体不同时刻的温度;有时也非必要,如单摆实验中摆线长度的测量。在这些情况下,约定真值 A 由单次测量值 x_m 表示,即

$$A = x_m \quad (1.7)$$

其误差估计为仪器精度等级所限定的误差 $\Delta_{\text{仪}}$ 或仪器分度值 N_{min} 的一半,即

$$\Delta x = \Delta_{\text{仪}} \quad \text{或} \quad \Delta x = N_{\text{min}}/2 \quad (1.8)$$

1.2.5.3 间接测量值的误差估算

间接测量值是通过一定函数关系由直接测量值计算得到。由于直接测量值存在误差,间接测量值也必然存在误差,这种影响可由相关的函数关系式计算得到。

① 一般函数关系。

设间接测量值 φ 与直接测量值 $x, y, z, \dots$ 有如下函数关系

$$\varphi = f(x, y, z, \dots) \quad (1.9)$$

$x, y, z, \dots$ 是互相独立的物理量,其误差分别为 $\Delta x, \Delta y, \Delta z, \dots$, 由于误差是微小量,相当于微分学中的增量,可借用求全微分的方法求间接测量的误差。误差又具有统计性质,由各分量用方和根法合成误差 $\Delta\varphi$, 有

$$\Delta\varphi = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2 (\Delta x)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)^2 (\Delta y)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial z}\right)^2 (\Delta z)^2 + \dots} \quad (1.10)$$

$$\frac{\Delta\varphi}{\varphi} = \sqrt{\left(\frac{\partial \ln f}{\partial x}\right)^2 (\Delta x)^2 + \left(\frac{\partial \ln f}{\partial y}\right)^2 (\Delta y)^2 + \left(\frac{\partial \ln f}{\partial z}\right)^2 (\Delta z)^2 + \dots} \quad (1.11)$$

式(1.10)适用于和、差函数关系,式(1.11)适用于积、商函数关系。

② 常用函数关系。

a. 和差函数

$$\varphi = x \pm y, \Delta\varphi = \sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2} \quad (1.12)$$

【例 1】 一个盛装空气的瓶质量 $M=(90.142\,5\pm0.000\,5)\text{ g}$, 如将空气抽出后称量, 其质量 $m'=(90.010\,5\pm0.000\,5)\text{ g}$, 求瓶中空气的质量 m 。

解 根据式(1.12), $m=M-m'=(90.142\,5-90.010\,5)\text{ g}=0.132\,0\text{ g}$

$$\Delta m = \sqrt{(\Delta M)^2 + (\Delta m')^2} = \sqrt{0.000\,5^2 \times 2} = 0.000\,7\text{ g}$$

$$m \pm \Delta m = (0.132\,0 \pm 0.000\,7)\text{ g}$$

b. 积商函数

$$\varphi = xy \text{ 或 } \varphi = \frac{x}{y}, \frac{\Delta \varphi}{\varphi} = \sqrt{\left(\frac{\Delta x}{x}\right)^2 + \left(\frac{\Delta y}{y}\right)^2} \quad (1.13)$$

【例 2】 圆的面积公式 $S=\pi D^2/4$, 测得直径 $D=(13.016\pm0.002)\text{ cm}$, 求面积 S 。

解 由式(1.13), $S=\pi D^2/4=3.141\,6\times13.016^2/4=133.059\text{ cm}^2$

$$\frac{\Delta S}{S} = \sqrt{\left(\frac{\Delta D}{D}\right)^2 \times 2} = 0.02\%, \Delta S = S\left(\frac{\Delta S}{S}\right) = 133.059 \times 0.02\% \approx 0.03\text{ cm}^2$$

$$S \pm \Delta S = (133.06 \pm 0.03)\text{ cm}^2$$

c. 指数函数

$$\varphi = \frac{x^k y^m}{z^n}, \frac{\Delta \varphi}{\varphi} = \sqrt{k\left(\frac{\Delta x}{x}\right)^2 + m\left(\frac{\Delta y}{y}\right)^2 + n\left(\frac{\Delta z}{z}\right)^2} \quad (1.14)$$

【例 3】 在单摆实验中, 由 $g=4\pi^2 L/T^2$ 计算重力加速度。若摆长和周期的测量值分别为 $L=(100.00\pm0.05)\times10^{-2}\text{ m}$ 和 $T=(2.006\,2\pm0.000\,9)\text{ s}$, 试计算重力加速度。

解 由(1.14)式, $g=4\pi^2 L/T^2=4\times3.141\,6^2\times1.000\,0/2.006\,2^2=9.808\,7\text{ m/s}^2$

$$\frac{\Delta g}{g} = \sqrt{\left(\frac{\Delta L}{L}\right)^2 + 2\left(\frac{\Delta T}{T}\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{0.05}{100.00}\right)^2 + 2\left(\frac{0.000\,9}{2.006\,2}\right)^2} = 0.08\%$$

$$\Delta g = g\left(\frac{\Delta g}{g}\right) = 9.808\,7\text{ (m/s}^2\text{)} \times 0.08\% = 0.008\text{ m/s}^2$$

$$g \pm \Delta g = (9.809 \pm 0.008)\text{ m/s}^2$$

1.2.6 测量结果的表示

1.2.6.1 不确定度

根据 JJF1059-1999《中华人民共和国国家计量技术规范》关于“测量不确定度评定与表示”的定义, 不确定度表征合理地赋予被测量之值的分散性, 是与测量结果相联系的参数。此参数可以是诸如标准差, 或说明了置信水准的区间的半宽度。

测量不确定度由多个分量组成。 其中一些分量可以用测量结果的统计分布估算, 并用实验标准差表征; 另一些分量则可用基于经验或其他信息的假定概率分布估算, 也可用标准差表征。测量结果应理解为被测量之值的最佳估计, 全部不确定度分量均分配给了分散性, 包括那些由系统效应引起的分量。

广义而言, 测量不确定度意为对测量结果正确性的可疑程度, 表征被测量的真值所处范围的评定, 是由测量结果给出的被测量估计值的可能误差的量度。

当给出完整的测量结果时, 应报告其测量不确定度。表示一个测量结果 x , 包括约定真值 A 、不确定度 u 和单位三部分, 即

$$x = (A \pm u) \text{ 单位} \quad (1.15)$$

式(1.15)表示被测量以一定的概率落在区间 $(A-u, A+u)$ 范围内。