



普通高等教育“十二五”规划教材

大学物理实验

第2版

王宏亮 主编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



014014500

04-33
411-2

普通高等教育“十二五”规划教材

大学物理实验

第2版

主 编 王宏亮

副主编 郭文阁 刘颖刚 冯德全

参 编 李 兰 白 燕 马成举

李娟妮等



04-33

411-2



机械工业出版社



北航

C1701324

002310310

本书参照教育部现行的《理工科大学物理实验课程教学基本要求》，并结合西安石油大学的特色编撰而成。全书共8章74个实验，形成层次化、模块化的内容体系。本书主要内容有测量误差、不确定度和数据处理，基本测量方法与仪器调节方法，常用仪器和器件简介，开放式预备性物理实验，基础物理实验，综合性实验，设计性与研究性实验等，并在各个实验中增设了“知识拓展”栏目，让学生自行设计实验和自行研究课题。

本书的结构和内容安排，旨在使学生在基本测量方法、数据处理方法和实验基本技能方面得到培养和训练，逐步拓展思维和开阔眼界，提高对实验方法和技术综合运用能力，提升学生进行综合性实验、设计性实验以及科学研究的综合素质，培养学生的创新意识、创新精神和创新能力。书中的一些实验与生产实践、科研联系密切，具有很强的时代气息。

本书在确保《理工科大学物理实验课程教学基本要求》的前提下，在撰述上力求突出物理思想、在内容的深度和广度上以“宽、新、活、用”为圭臬，冀图在凸显现代理工科物理实验的特色上作些探索。

本书为理工科院校各专业本科生的物理实验教学用书，也可作为物理类专业课程的选题设计用书。

图书在版编目 (CIP) 数据

大学物理实验/王宏亮主编. —2版. —北京: 机械工业出版社, 2013. 12
普通高等教育“十二五”规划教材
ISBN 978-7-111-44837-2

I. ①大… II. ①王… III. ①物理学—实验—高等学校—教材
IV. ①04-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 274522 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: 李永联 责任编辑: 李永联

版式设计: 霍永明 责任校对: 陈延翔

封面设计: 马精明 责任印制: 李 洋

北京振兴源印务有限公司印刷

2014 年 1 月第 2 版第 1 次印刷

169mm×239mm · 23.5 印张 · 520 千字

标准书号: ISBN 978-7-111-44837-2

定价: 35.00 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

社服务中心: (010) 88361066

教材网: <http://www.cmpedu.com>

销售一部: (010) 68326294

机工官网: <http://www.cmpbook.com>

销售二部: (010) 88379649

机工官博: <http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线: (010) 88379203

封面防伪标均为盗版

第2版前言

本书第1版在校内面向学生已经使用4届,取得了较好的效果。

本次修订是在西安石油大学物理实验课程教学改革和实践的基础上,根据教育部关于“开展高等学校实验教学示范中心建设”的有关精神,与省级优秀教学成果——“多层次预约开放式物理实验教学新体系的建设与实践”相配套,充分考虑了应用型本科工程类专业人才培养模式的特点及课程结构调整等因素,参照教育部《大学物理实验课程教学基本要求》,在精心增选了部分与石油工程相关的综合性物理实验项目的基础上完成的。本次修订将进一步增强学生的学习兴趣,提高学生的学习动力和学习效果,提升学生主动学习的信心,促进学生的正确思维,从而强化对学生科研素养和创新能力的培养。

本书力求概念准确,一些基本名词术语与国际标准和国家标准接轨,在误差处理上,摒弃平均误差的概念,采用不确定度的概念。

本书是西安石油大学物理实验中心教职工近年来教学改革成果的结晶。参加编写本教材的老师有:王宏亮(第1章、第2章、第8章中8.1节、8.2节、8.3节)、郭文阁(第5章、实验64)、刘颖刚(第3章、第4章、实验65~69及全书校稿)、冯德全(实验55、实验57~63、实验70~74)、李兰(实验35)、马成举(实验37~39)、李东明(实验14、实验19、实验21)、白燕(实验10、实验12、实验30、实验40)、张小真(实验26~28)、白亮(实验36、实验47、实验49、实验50)、罗小东(实验16,实验24,实验54)、温俊青(实验20,实验25,实验46)、李娟妮(实验34,实验41,实验44)、高宏(实验15,实验17,实验48,实验51及全书校稿)、王伟(实验18,实验22,实验42)、宋利娜(实验11,实验31)、尉婷(实验23,实验29)、兆雪(实验9,实验43)、赵大壮(实验45)、周红(实验53,实验56)、禹大宽(实验32,第4章的部分内容)、李晓莉(实验13)、王春(实验33)、刘钦朋(实验52)、樊伟(附录)。

陕西师范大学史志强教授审阅了全书,提出了非常宝贵的意见,在此表示衷心的感谢!

编写一本体系完整、内容新颖、切合实际而又富有时代气息的实验教材,需要勇于探索和不断实践。由于作者水平有限,教材中难免存在错误和不妥之处,恳请读者提出批评指正。

编者

目 录

第2版前言

第1章 绪论	1
1.1 物理实验课程的目的和任务	1
1.2 物理实验课程的教学环节	2
1.3 物理实验室守则	3
第2章 测量误差、不确定度和数据处理	4
2.1 测量与测量误差	4
2.2 误差分类及相关知识	6
2.3 测量不确定度及其评定	14
2.4 有效数字	19
2.5 实验数据处理的基本方法	22
2.6 数据处理实例	29
第3章 基本测量方法与仪器调节方法	32
3.1 基本测量方法	32
3.2 仪器调节方法	36
第4章 常用仪器和器件简介	41
4.1 长度测量仪器	41
4.2 时间测量仪器	44
4.3 质量称衡仪器	45
4.4 温度测量仪器	47
4.5 电磁测量仪器	49
4.6 常用电子仪器	53
4.7 常用光学仪器	59
4.8 常用光源	61
第5章 开放式预备性物理实验	64
5.1 长度的测量	64
实验1 用常用量具测量物体的长度	64
实验2 用光学法测量长度	68
5.2 质量的测量	70
实验3 用天平测量物体的质量和密度	70
5.3 时间的测量	74
实验4 用机械秒表和电子秒表测量单摆的周期	75
5.4 电流的测量	76
实验5 电流表和电压表的使用及测量电路	76

实验 6 电流表和电压表的改装与校准	79
5.5 温度的测量	84
实验 7 冰的熔解热的测定	85
实验 8 用非平衡电桥测温度	89
第 6 章 基础物理实验	93
6.1 物性测量	93
实验 9 液体比汽化热的测定	93
实验 10 用拉伸法测量金属丝的弹性模量	96
实验 11 金属线膨胀系数的测定	100
实验 12 用落球法测定液体动力粘度	103
实验 13 刚体转动惯量的测定	109
实验 14 热敏电阻温度特性研究	113
实验 15 不良导体热导率的测定	122
6.2 电磁实验与电磁参量测量	127
实验 16 静电场的描绘	127
实验 17 用十一线电位差计测量电池电动势及其内阻	132
实验 18 低压电位差计的使用	137
实验 19 非线性元件伏安特性研究	141
实验 20 用直流电桥测定电阻温度系数	147
实验 21 热电偶的温差电动势测量与标定	152
实验 22 用电位差计测量电表的内阻和校准电表	158
实验 23 用惠斯顿电桥测量中值电阻	160
实验 24 用开尔文电桥测量低值电阻	165
实验 25 示波器的使用	171
实验 26 铁磁材料磁化曲线与磁滞回线测绘	181
实验 27 灵敏电流计特性的研究	186
实验 28 载流线圈磁场分布的测量	191
实验 29 霍尔效应及其应用研究	196
实验 30 RLC 串联电路暂态过程的研究	204
6.3 光学实验与光学参量测量	212
实验 31 分光计的调整与玻璃三棱镜折射率的测量	212
实验 32 等厚干涉——劈尖和牛顿环	219
实验 33 光强分布的测量	225
实验 34 摄影与暗室技术	230
实验 35 用光栅衍射法测量光的波长	239
第 7 章 综合性实验	245
7.1 一般综合性实验	245
实验 36 用迈克尔逊干涉仪测量光波的波长	245
实验 37 超声波在空气中传播速度的测量	248
实验 38 用光电效应法测定普朗克常数	253

实验 39	夫兰克-赫兹实验	258
实验 40	电子荷质比的测定	263
实验 41	用相位法测定声速	268
实验 42	弹簧振子运动规律的研究	271
实验 43	弦驻波的实验研究	274
实验 44	磁悬浮实验	278
实验 45	黑体红外光谱研究	282
7.2	应用型综合实验	287
实验 46	用旋光仪测定旋光溶液的旋光率和浓度	287
实验 47	单缝衍射及在现代检测中的应用	293
实验 48	双光束干涉测量空气的折射率	296
实验 49	光栅分光光度计	300
实验 50	超声波在液体中传播速度的测量	303
实验 51	用毛细管测定石油产品的运动粘度	307
实验 52	不同温度下(油水混合)液体密度的测量	312
实验 53	油水混合液体比热容的测量	314
第 8 章	设计性与研究性实验	319
8.1	实验设计的基本原则	319
8.2	实验设计的程序	320
8.3	实验设计的基本思想方法	321
8.4	一般设计性与综合性设计实验	323
实验 54	电源控制电路特性研究	323
实验 55	电势补偿法测量低电势实验装置的设计	326
实验 56	材料弹性模量和泊松比的测定	327
实验 57	半导体温度计的设计	330
实验 58	电阻应变片压力传感器特性研究与应用	331
实验 59	硅光电池的光照特性研究	333
实验 60	光敏电阻特性研究与光开关的设计	335
实验 61	声、光控制电路的设计与制作	338
实验 62	三用表的设计、制作与校准	340
实验 63	细铜漆包线电阻率的测定与测量结果的评价	342
实验 64	单摆运动规律的研究	343
8.5	研究性实验	347
实验 65	980 nm/1 480 nm 泵浦激光器特性研究	348
实验 66	掺铒光纤荧光光源的研究	348
实验 67	掺铒光纤放大器的实验研究	348
实验 68	基于光纤 Bragg 光栅的掺铒光纤激光器的研究	349
实验 69	掺铒光纤激光器波长调谐技术研究	349
实验 70	光纤光栅温度响应特性的实验研究	350
实验 71	光纤光栅应变响应特性的实验研究	351

实验 72 光纤光栅压力响应特性的实验研究	351
实验 73 光纤光栅传感增敏技术的实验研究	351
实验 74 解决光纤光栅温度—应变交叉敏感问题的研究	352
附录	353
附录 A 国际单位制 (SI) 基本单位	353
附录 B 基本物理常数	354
附录 C 20 °C 时部分金属的弹性模量	354
附录 D 20 °C 时部分物质的密度	355
附录 E 部分物质中的声速	356
附录 F 常用光源对应的谱线波长	356
附录 G 部分物质的比热容	357
附录 H 几种常用热电偶的温差电动势	358
附录 I 几种纯金属的“红限”波长及功函数	360
附录 J 部分物质的折射率 (相对空气)	360
附录 K 常见材料的相对介电常数	361
附录 L 可见光颜色与频率的对应关系	362
附录 M WPL 型摄谱仪的线色散率倒数	362
附录 N 几种常用激光器的输出波长	363
附录 O 部分型号霍尔元件参数表	363
附录 P 空气的相对湿度与干湿球温度计温差的关系	364
附录 Q 水在不同温度下的饱和蒸汽压	364
附录 R 不同温度下纯水的密度	365

第1章 绪 论

物理学本质上是一门实验学科。无论是物理规律的发现，还是物理理论的验证，都离不开物理实验。在物理学发展的道路上，物理实验始终支撑着高新技术的成长和发展，大到宇航技术，小到微电子技术，无不与物理实验有着千丝万缕的联系。

物理实验是新兴科学技术的生长点，在推进科学技术的进步和国民经济的发展中起着重要的作用。由于实验是科学前沿最为活跃的领域，当新的自然现象被发现和新的实验技术形成后，人们往往利用这些新成果，进一步跟踪、创新和扩大成果，并创造出一个又一个崭新的科学技术。

科学实验，首先是物理实验，它和生产技术紧密相关。它能凭借实验室的优越条件，超越生产实践的某些局限，步入生产实践的前列，为生产技术的发展开辟出新的道路。

科学史表明，自然科学的重大突破，一般不是直接来自生产实践，往往要通过科学实验。例如，电磁感应定律的确立、狭义相对论的发现、量子理论的兴起、基因学说的形成，都不是直接来源于生产实践，而是源于实验研究的结果。

爱因斯坦有句名言：应该把建立独立思考和独立判断的一般能力始终放在首位，而不应该把获得专业知识放在首位。诺贝尔物理学奖获得者李政道也说过，动手多了会让人聪明。物理实验就是通过学生动手动脑，让学生学会最基本的实验知识、最基本的物理思想和最基本的科学实验方法。

1.1 物理实验课程的目的和任务

物理实验既是对学生进行科学实验的基本训练，又是学生进入大学后接受系统实验方法和实验技能训练的一门课程。它是一门独立设课、学生必修的实验基础课，为学生学习后续实验课程和进行工程实验打下必要的基础。

物理实验课的任务是：

- 1) 通过对实验现象的观测、分析和对物理量的测量，学习并掌握物理实验的基本知识、基本方法和基本技能。
- 2) 使学生学会常用物理仪器的调整方法及正确的使用方法。
- 3) 使学生初步具备处理数据、分析实验结果和撰写实验报告的能力。
- 4) 培养学生对待科学实验一丝不苟的严谨态度和实事求是的工作作风。

1.2 物理实验课程的教学环节

1.2.1 实验前的预习

课前认真阅读教材和有关资料,弄清实验的目的、原理、仪器的使用和测量方法,了解实验的主要步骤及注意事项等,在此基础上写出明晰的预习报告。预习报告应简明扼要,它包括:实验名称、目的、原理、仪器规格和实验需要记录的数据表格。

1.2.2 实验操作

学生进入实验室,首先要遵守实验室的规章制度,认真领悟实验的注意事项、仪器的操作规程及实验方法。通过实验操作特别注意观察各过程中的物理现象,仔细分析实验现象所揭示的物理规律是否正确,实验条件是否满足等。这是实验的基础,只有打好这样的基础,才能进行下一步的测量,否则,测量过程就会成为只动手不动脑的机械操作,也就毫无意义。在测量过程中,要不断对实验数据进行分析,随时改进实验方法,以求取得最满意的实验结果。通过实验的亲身实践,要力求得到更多的启发,例如,本实验还有无其他设计方案?有无其他更好的测量方法?要大胆提出自己的创新思想。

实验完毕,学生记录的数据应提交指导教师进行审查验收,并将仪器复位归整好后,方能离开实验室。

1.2.3 撰写实验报告

实验报告是实验工作的最后总结。通过撰写实验报告,可以培养学生撰写科学实验报告或科学技术报告的能力和对研究工作进行总结的能力。实验报告的字迹要清楚,文理要通顺、简明扼要,图表应明晰正确。

实验报告的内容应包括:

- 1) 实验名称。
- 2) 实验班级,姓名,学号,实验日期。
- 3) 实验目的:要用自己的语言简明扼要地写明为什么要做这个实验。
- 4) 实验原理:要用自己的语言简明扼要地写明实验的基本理论依据,包括:物理模型和数学模型、实验装置示意图、所用的测量方法和实验条件等。
- 5) 实验仪器:简要写明主要仪器的型号、规格、精度或最小分度值。
- 6) 实验操作步骤:按实际操作情况简明扼要地列写。
- 7) 实验数据记录:应将实验过程记录下的原始数据填入报告中所列的数据表格中。
- 8) 数据处理:简要写明数据处理的方法,突出处理方法的计算过程或所作图线的拟合,以最终测量结果表达的形式将本实验结果报告出来。
- 9) 不确定度分析:简要明晰地分析出影响测量结果不确定度的主要因素,并指出

解决问题的途径。

10) 问题讨论: 对本实验所观测到的现象、涉及到的实验方法、测量技术进行优劣分析和讨论, 回答所布置的问题。

11) 结论: 针对测量结果, 简要明晰地写出你所得出的结论。

12) 创新: 通过本实验的学习, 完成教材提出的知识拓展题目。

1.3 物理实验室守则

1) 进入实验室, 要树立安全第一的观念, 实验过程中确保人身及设备安全。

2) 课前做好预习, 进入实验室应对号入座, 首先从外观检查和核实实验仪器、用具、材料等, 发现有短缺, 应及时报告指导教师, 切勿搬运他人的仪器和器材。

3) 在实验过程中, 应保持严肃认真和实事求是的科学态度, 严格遵守实验室的纪律, 保持实验室的安静环境。

4) 爱护仪器设备, 如有损坏、丢失, 应立即报告指导教师。由于粗心大意或违反操作规程而损坏仪器者, 除按规定赔偿外, 还应做出书面检讨, 并依情节轻重, 做出处理。

5) 凡使用电源的实验, 必须经指导教师检查电路并同意后, 才能开启电源。

6) 做完实验, 测量数据要经教师审查核对签字。离开实验室前, 应将仪器整理还原, 桌面收拾整洁, 凳子摆放整齐, 负责值日的学生做好实验室的卫生。

7) 按时完成和上交实验报告。

第2章 测量误差、不确定度和数据处理

2.1 测量与测量误差

2.1.1 被测量及其单位

在科学实验中，一切物理量都是通过测量得到的。所谓测量，就是将被测物理量与规定作为标准单位的同类物理量（或称为标准量）通过一定的方法进行比较，得出测量中的比较倍数，即为被测量的测量值。测量值是由数值和单位两部分组合而成。

根据国际标准化组织（ISO）编辑出版的 ISO 标准手册和我国的国家标准 GB 3100~3102—1993，物理量的测量值按其学科可划分为 11 类：

- 1) 空间和时间的量，如长度、角度、时间、速度等。
- 2) 周期及其有关的量，如频率、波长、振幅、阻尼系数等。
- 3) 力学量，如质量、密度、力、功、能、流量等。
- 4) 热学量，如热力学温度、热量、比热容、热导率等。
- 5) 电学和磁学量，如电流、电位、磁通量、磁导率等。
- 6) 光及有关电磁辐射的量，如发光强度、光通量、照度、辐射强度等。
- 7) 声学量，如声压、声速、声强等。
- 8) 物理化学和分子物理学量，如阿伏加德罗常数、摩尔质量、玻耳兹曼常数等。
- 9) 原子物理学和核物理学的量，如原子质量、电子质量、普朗克常量、里德伯常量等。
- 10) 核反应和电离辐射的量，如粒子通量密度、能通量密度、活度、吸收剂量等。
- 11) 固体力学量，如霍尔系数、汤姆逊系数、理查逊常数等。

工程上常见的量除上述物理量外，还有许多其他的量，如物质的硬度，弹性模量、感光度等。然而，就量的种类而言，可以毫不夸张地说，工程上的绝大部分测量都是对物理量的测量，这些量有些是表征物性的，有些则是反映物理学规律的。

测量必须注意其测量值与单位的完整表述，也必须注意被测量单位的国际单位制（IS）表述。

2.1.2 测量分类与测量条件

1. 测量分类

测量总是离不开测量人员用测量仪器获取测量值的方法，总是在确定的条件下进行的。因此，按获得被测量值的方法不同可将测量分为两类：

（1）直接测量 借助测量仪器能直接读出被测量的测量值。例如，用米尺测量长度，用天平称衡物体的质量，用秒表测量时间等都属于直接测量，而相应的被测

量——长度、质量、时间等称为直接被测量。

(2) 间接测量 需要先获取直接被测量的值, 然后按照已知的函数关系经过一定运算才能求得被测量的测量值。例如, 测量圆柱体的体积 V 时, 首先用测长度的仪器对圆柱体的直径 d 和高度 h 进行直接测量, 然后将测量值 d 和 h 代入公式 $V = \frac{\pi d^2 h}{4}$ 中, 计算出圆柱体的体积 V 的值。此例中, d 和 h 是直接被测量, V 是间接被测量。

一般地说, 大多数测量都是间接测量。但随着科学技术的发展, 很多原来只能以间接测量方式来获得的物理量, 现在也可采用直接的方式测量了。例如, 电功率的测量, 现在可用功率表直接测量, 又如, 速度也可用速率表直接测量其大小等。

按测量条件是否相同又可将测量分为两类:

(1) 等精度测量 在相同条件下进行的一系列测量。例如, 同一人员在同样的环境下, 在同一台仪器上, 采用相同测量方法, 对同一被测量进行多次测量。

(2) 非等精度测量 在测量过程中, 若改变测量条件, 如更换测量人员、更换测量仪器、改变测量方法、更改测量参数以及改变测量环境等, 则在测量条件变更前后, 测量结果的精确度不会相同。

2. 测量条件

测量条件是指一切能够影响测量结果, 而本质上又可控制的全部因素。它包含有: 进行测量的人员、测量方法、测量仪器与调整方法、环境条件等。环境条件是指测量过程中的环境温度、湿度、大气压、气流、振动、辐射等。

2.1.3 测量误差

任何物质都具有反映自身特征的量, 这些量所具有的客观、真实的数值称为这些物理量的真值。测量的目的就是要力求得到这些物理量的真值。但测量总是要依赖于进行测量的人员和使用一定的仪器, 依据一定的理论和方法, 在一定的环境和实验条件下进行。在测量过程中, 由于受到测量人员的水平、测量仪器、测量方法和测量条件的限制或受一些不确定因素的影响, 使测量结果与客观存在的真值不可能完全相同, 总是存在一定的差异, 也就是说, 被测值只能是该真值的近似值。因此, 任何一种测量结果的测量值与其真值之间总会或多或少地存在一定的差值, 这种差值称为该测量值的测量误差 (或称被测值的绝对误差), 即

$$\Delta N = N - N_0 \quad (2-1)$$

由于真值 N_0 可能是随机变量, 测量值 N 也可能是随机变量, 因此, 误差也是随机变量, 它既没有确定的大小, 也没有确定的方向, 仅能用特征值来表示其统计意义上的大小, 这样的特征值主要有: 误差期望值、误差的标准差、误差极限值、误差的有效值 (或误差的方均根值) 等。

误差存在于一切测量之中, 而且贯穿测量过程的始末, 因此, 测量者的根本任务就是在承认误差存在这一基本事实的前提下, 通过科学的测量方法, 将测量误差限制到最低限度, 这就是一个优秀的实验工作者应遵循的最基本的原则, 也是一切科技工作者进行科学实验应有的基本素质。

式(2-1)所表示的是绝对误差,其值可正可负,它是随机变量,没有确定的大小。绝对误差并非“误差”的“绝对值”,它表示被测量的测量值偏离真值的大小和方向。当两个被测量相同时,可以用绝对误差的大小评定测量的精密度,但当两个被测量不相同,只从绝对误差的大小是难以评定各测量结果谁优谁劣的。例如,用同一把米尺测量两物体的长度,分别测得 $L=(2.5\pm0.5)\text{ mm}$ 和 $L'=(250.0\pm0.5)\text{ mm}$,两者的绝对误差都是 0.5 mm ,哪一个测量的精密度高呢?为了比较,只能用相对误差的概念,它定义为

$$E=\frac{\Delta N}{N_0} \quad (2-2)$$

由于式(2-1)和式(2-2)中的真值 N_0 不能确定,因此,两式所表示的绝对误差和相对误差也无法确定。在实际测量中,常用被测量的实际值 N 取代真值 N_0 。

引入相对误差的概念后,将上述用同一把米尺测量两物体的长度 L 和 L' 代入式(2-2)中,并分别以百分数表示为

$$E_L=\frac{\Delta L}{L}\times 100\%=\frac{0.5}{2.5}\times 100\%=20\%$$
$$E_{L'}=\frac{\Delta L'}{L'}\times 100\%=\frac{0.5}{250.0}\times 100\%=0.2\%$$

通过比较,显然, L' 的相对误差小于 L 的相对误差,表明 L' 的精密度要比 L 高得多。

2.2 误差分类及相关知识

从数学的观点来看,自然界存在着两种类型的规律,即确定性规律与统计性规律,这两种规律分别与两类现象相对应。

确定性规律:在一定的条件下,某个结果一定会出现,例如,同性电荷相斥。这里,电荷同性为条件,相斥是结果,可用库仑定律描述这一条件与结果的函数关系。显然,由这种现象的前因引起的后果是可以预知的。

统计性规律:在一定的条件下,某个结果可能出现,也可能不出现。例如,用同样的力和同样的方式上抛硬币,下落后国徽面向上的结果是不确定的,既不是一定的,也不是不可能的,国徽面向上这一结果完全是随机的,每次抛掷的结果事先都是不可预言的。然而,实践证明,抛掷次数足够多时,国徽面向上的机会约为 $\frac{1}{2}$,这就表明,在特定条件下,这类事先不可预知结果的现象也存在着规律性。寻求这种规律的方法是,对大量的数据进行统计分析,这正是将其称为统计规律的原因。完善地描述统计规律的数学方法是,说明分布函数或分布密度函数。

例如,气体分子按速率的分布可用气体分子按速率(比例)的分布函数来描述。数学上已总结出来的分布有多种,物理实验中将提到的有正态分布和均匀分布等。用分布函数描述统计规律并没有改变被描述现象的随机性。本例中“比例”一词换用“概率”更为恰当,因为反映比例数的分布函数值是概率。

从测量学的观点来看,确定性规律和统计性规律也分别与系统误差和随机误差相对应。

2.2.1 系统误差

在同一实验条件下,多次测量同一物理量时,误差的绝对值和正负号保持不变,或按一定的规律变化,将这种保持不变或事先可预知其变化并服从确定性规律的误差,称为系统误差。由于系统误差具有确定性,所以一般情况下都可以找到其原因并可事先修正。系统误差主要来源于以下几个方面:

1. 理论(方法)误差

理论(方法)误差归因于测量所依据的理论公式本身的近似性,或实验条件不能满足理论公式的要求,或测量方法的不完善等引起的误差。例如,单摆周期公式 $T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$ 成立的条件是摆角趋于零,这实际上是不可能达到的,所以测量周期必然引入误差。

2. 仪器误差

仪器误差是测量仪器本身的固有缺陷或者使用条件不满足引起的误差。例如,用未经校准零位的外径千分尺测量某工件长度,必将引入误差。

3. 环境条件误差

由于诸如温度、气压、空气湿度等环境条件的变化引起的误差。

4. 人员误差

人员误差是由测量者的生理或心理因素的变化以及观测习惯的不同所引起的误差。例如,不是正视刻线,而总是斜视刻线等引起的误差。

2.2.2 系统误差的发现与消除

测量者的根本任务是将测量误差限制到最小限度。对于系统误差,其规律及来源若是测量者已知的,则称为可定系统误差;若是未知的,则称为未定系统误差。对于前者,一般可在测量中采取一定措施予以减小、消除或在测量结果中予以修正,而对于后者一般难以做出修正,只能估计它的取值范围。

1. 可定系统误差的发现

为了发现系统误差,测量者应全面、仔细地考察和分析实验理论模型的建立、测量方法、仪器及其状态调整、环境条件等。由于系统误差的存在,对于不同实验来说,缺少共性。下面介绍几种分析和发现系统误差的方法。

(1) 实验对比法

1) 用不同的方法测量同一被测量,比较测量结果是否一致。例如,用单摆法、复摆法、自由落体法分别测量重力加速度 g ,若各自所得的测量结果在随机误差允许范围内不重合,则说明至少其中有两个存在系统误差。

2) 用两个电流表串联于电路中测量流过同一电路的电流,比较读数是否一致,若

读数不一致,说明至少有一个电流表不准。如果其中一个表为标准表,则另一表有待于校准。

3) 通过交换测量方法,比较交换前后过程的测量结果是否重合。例如,天平的称衡换位,金属丝拉伸时的增减砝码。若交换前后所得测量结果不一致,则说明存在系统误差。

4) 通过更换测量人员,比较各自测量结果是否一致。若两人用同一仪器、采用同一测量方法测量同一被测量,所测得结果不一致,则说明至少有一人的测量存在系统误差。

(2) 理论分析法

1) 理论分析公式所要求的条件与实际情况有无差异。如在单摆实验中,公式 $T=2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$ 作了摆角 $\theta \approx 0$ 的近似,摆球视为质点,忽略摆线质量、空气浮力和阻力等。这些都是被理想化了的,实际测量单摆周期 T 时,存在系统误差。

2) 分析仪器所要求的工作条件是否满足要求。如物理天平的刀承面要处于水平位置,立柱要处于铅直位置,三线悬摆的摆盘要水平等,否则不能满足仪器使用条件,在实际称衡物体质量和测量扭摆周期时,存在系统误差。

3) 分析多次测量的数据,若明显不服从统计规律,且偏差又呈现单一方向变化,则说明存在系统误差;若偏差的正负号有规律地交替变化,则说明存在周期性系统误差。

2. 可定系统误差的消除

可定系统误差是容易被发现的,首先是立足于避免,如保证仪器使用满足规定条件等,如无法避免,可针对不同的实验方法按以下不同的方法予以消除。

(1) 直接校准法 测量前要先检查零位,如各类电表在未通电时,指针不指零位,可通过调整“机械调零器”,将指针校准到零位;对于一些自身就带有“短路”调零旋钮的平衡指示仪,可随时监测并调零,消除由于零位不准引起的系统误差。

(2) 引入修正值对测量结果修正

1) 量具或测量仪器的零值误差的修正。许多测量仪器的零位不能直接校准,只能在测量前将零位偏离值读出,按偏离的正负对测量结果进行修正。

2) 通过标准仪器与一般仪器的校准值或校准曲线对长期使用的仪器进行校准。

3) 根据理论分析导出不满足测量条件的近似公式的修正式,消除这类系统误差的方法是将公式略去部分作为修正值,对测量结果进行修正。例如,用无阻尼单摆测量重力加速度 g ,若不考虑摆角 θ 的影响,则单摆周期公式为 $T=2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$;若考虑摆角 θ 的影响,则公式为

$$T=2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}\left(1+\frac{1}{4}\sin^2\frac{\theta}{2}+\cdots\right)$$

相应可得

$$g = \frac{4\pi^2 l}{T^2} \left(1 + \frac{1}{4} \sin^2 \frac{\theta}{2} + \dots\right)^2$$

第一项之后的高阶小量就是修正量。经这样的修正，就能部分地消除摆角对测量结果的影响。

(3) 通过仪器的设计和测量方法的选择抵消系统误差的影响 常通过仪器的设计和选择适当的测量方法，来抵消或补偿系统误差。常用的方法有：

1) 利用仪器读数装置的对称设计抵消系统误差的影响。例如，分光计读数盘设计为相隔 180° 的左右角游标，以消除偏心差引起的系统误差。

2) 将测量中的某些因素（如被测物）交换位置。例如，用天平称衡物体质量时，常将被测物和砝码在盘中的位置互换，分别测出质量 m 和 m' ，按公式 $m_{\text{平均}} = \sqrt{mm'} \approx \frac{1}{2}(m+m')$ 计算后，即可消除天平不等臂引起的系统误差。其实质是使产生系统误差的原因对测量结果起相互反作用。

3) 在一定条件下，用一已知量替代被测量来消除系统误差的影响。例如，先取大小不同、质量不等的替代物与被测物平衡，然后在不改变替代物质量的情况下，取下被测物换上砝码并使天平再次平衡，则砝码的质量即为被测物的质量，从而消除了天平结构缺陷带来的系统误差。

4) 通过改变测量的方向使系统误差产生等值异号，然后求其平均作抵消。例如，用霍尔元件测磁场时，将霍尔元件的工作电流和励磁电流的方向换向四次，不等电位就出现了两次正值，两次负值，四次平均，不等电位就被抵消。

5) 利用某种系统误差在任何相差半个周期的两对应点处的绝对值相等而符号相反，可通过半周期的偶数法予以消除这种系统误差，即每次都在相差半个周期处测量两次，取其平均值作为测量结果，便可消除此类系统误差。

3. 未定系统误差的处理

未定系统误差大都包含在仪器和量具的仪器误差（限） Δ_{ins} 中，它是指在满足仪器规定使用条件下正确使用仪器时，仪器的示值与被测量值的真值之间可能产生的最大误差的绝对值。它是既无法消除，也不能作修正，只能作为一种分量加以合成。

导致仪器产生仪器误差的因素是多方面的，现以电表为例说明组成电表仪器误差的因素。它们分别为：

- 1) 轴尖、轴套间的摩擦。
- 2) 磁场不均匀。
- 3) 游丝劲度系数不均匀及游丝老化。
- 4) 分度刻线不均匀。
- 5) 调整仪表指针到要求的示值所引起的起伏。
- 6) 外界条件的变动对仪表读数的影响。若仪器的可定系统误差为 ϵ_e ，未定系统误差为 ϵ_s ，随机误差为 ϵ_R ，则仪器误差可表示为

$$\Delta_{\text{ins}} = |\epsilon_e| + c \sqrt{\epsilon_R^2 + \epsilon_s^2} = |\epsilon_e| + c\epsilon \quad (2-3)$$