

大学物理实验

第一册

中国科学技术大学普通物理实验室 编



中国科学技术大学出版社



大学物理实验

第一册

中国科学技术大学普通物理实验室 编



中国科学技术大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

大学物理实验(第一册)/中国科学技术大学普通物理实验室编.

—合肥:中国科学技术大学出版社,1996年3月

ISBN 7-312-00787-2

- I 大学物理实验
- II 中国科学技术大学普通物理实验室
- III ①普通物理实验 ②教程 ③大学用书
- IV O

中国科学技术大学出版社出版发行

(安徽省合肥市金寨路96号,230026)

中国科学技术大学印刷厂印刷

全国新华书店经销

开本:787×1092/16 印张:14.5 字数:344千

1996年3月第1版 1999年1月第2次印刷

印数:6001—12000册

ISBN 7-312-00787-2/O·175 定价:13.70元

序

物理学是自然科学中的一门重要学科。它所研究的对象是物质。古代学者对自然界有各种思辨性的推想,直到十三世纪罗杰尔·培根(Roger Bacon)提出一个科学上的名言:检验前人说理的唯一方法只有观察与实验。这是科学需要实验的第一声。

六百年后英国剑桥建立卡文迪许实验室,第一任卡文迪许讲座的教授是麦克斯韦(Maxwell, 1831-1879)。他上任后第一课就以“实验物理学导论”为题,强调这个课程除了要注意培养学生分析思考能力外,更重要的是要求学生着意观察,用手去操作,用敏锐的视觉、聪明的听力、纤微的触觉、灵巧的手指接触事物。他教导学生以自身在实验中所接触到的、感受到的东西来启发自己的思考。

以往哲人的启示正是值得我们在学习中身体力行的。

我国大学中设物理学课始于清末,但开始时只是口授讲课。到民国初期颜任光、胡刚复两人分掌北京大学、南京高等师范,各自在物理课中开始正式设物理实验室,推动了我国物理学教育的进步,故有“南胡北颜”之誉。今日各学校物理课中都有实验部分了。

随着科学技术的不断发展,新知识、新技术不断涌现,物理实验教学也就需要进行改进。有鉴于此,我校从事物理实验教学的同志们经过多年努力,在总结我校物理实验教学的基础上,吸收兄弟院校的经验,编写出这套大学物理实验教材,这是可喜的。

这套教材有以下几个特色:

一、突出综合性。将力学、热学、电磁学、光学、部分近代物理诸物理学分支统一考虑,按知识层次,分为三册出版,不同学科群(工商管理类、工科类、化学生物类、物理类)可选择自己需要的部分使用。

二、强调基础知识、基本方法、基本测量的训练,注意基本物理设计思想、实验方法及技术的归纳与培养。

三、注意物质性质研究和物理量测量方法的历史与现状的介绍。

四、在保证基本训练基础上,兼及设计性、综合性及现代技术应用诸方面,使学生开拓知识面。

该套教材作为一种尝试,不足之处,有待于今后在教学实践中不断完善,但这毕竟是我校物理实验教学的一个成果,相信它的出版会对物理实验教学改革有良好推动作用。

钱临照

1995年10月10日

前言

面对科学技术日新月异的发展趋势,新科技和新学科不断涌现而带来的科学知识的不断更新,加强基础、培养能力、拓宽知识面、增强适应能力是大学物理实验教育的光荣使命。根据国家教委有关深化教育改革的基本精神,结合我校学科群规划及几十年物理实验教学实践的经验,编写了本套大学物理实验教材。

本教材共分为三册,试图以物理实验思想方法、误差分析、物理量的测量、物性和物理规律的研究为线索,突出“基本知识、基本方法、基本测量”的强化训练,扩大设计性和综合性的实验的比例,根据不同的实验层次和阶段配以相应的实验课题。在编写教材时,我们尝试以下列几条作为出发点。

(1)加强基础训练,提高起点,增加层次,开扩视野。

增加物理实验思想和方法的专题介绍,并强调将学习物理思想和方法的主题贯穿整个物理实验教学的始终,加强实验误差分析和基本物理量测量的训练,增加适当的选做实验和少量自选题内容,并通过引言和附录的形式简单地介绍了相关测量技术的发展、国际标准和最新成就,便于有兴趣的同学参考和查阅有关书籍和文献,亦可作为后续实验课或研究的参考书目。

(2)介绍用不同的实验方法和技术测量相同的物理量,比较各种方法的优、缺点,以及适用范围,使同学们了解在不同的测量范围,需要用不同的实验仪器、不同的测量方法和技术,同时还了解到物理量数量级的变化会导致物理性质的改变。例如:长度测量,其测量范围可由 10^{-26} 到 10^{26} 米,跨越了微观、介观、宏观物理及宇宙学四大研究领域。

(3)用相同的实验仪器,加以精心安排和巧妙组合,使之能测量不同的物理量,或研究不同的课题。

(4)增加了综合与设计性实验,有利于调动学生的主观能动性,提高学生实验动手能力、观察问题、分析问题和解决问题的综合能力。

第一册作为第一个层次共25个实验和有关物理实验方法、数据处理及误差分析的内容,强调实验的基础知识、基本方法、基本测量的训练,注重一些基本物理设计思想和实验方法及技术的归纳;对一些最基本物理量如:时间、长度、质量、温度、电流的测量知识作了简单的介绍,开设了一些基本物理量测量和某些物性或物理规律的研究的实验;为加深对随机误差统计规律的了解,安排了两个相关的实验。在第四章安排一些综合性、设计性或近代物理中的实验,希望能对学生拓宽知识面及提高独立研究问题的能力有所帮助。

第二册作为第二个层次共25个实验,着重基本仪器的使用 and 选择,实现实验目的要求的仪器选用、组合或改进,某些物理规律的研究及部分综合性、设计性和近代物理的实验。学生在完成第一、二册内容的实验内容后,应该达到工科物理实验的教学要求,为后续实验课打下良好的基础。

第三册作为第三个层次共25个实验,着重实验设计的初步入门:如何设计及达到实验所要求的水平,通过选择仪器(自己阅读参考书或仪器说明)扩宽知识和实验能力,这类实验可能做的个数不很多,但要强调实验课题的完整,独立完成并作为科学研究实验设计的初步训练。

作为本书的编写基础是原中国科学技术大学的物理实验讲义,几十年来许多同志参加编

写修改,是他们丰富经验的总结和辛勤劳动的成果。同时,还参考了许多兄弟院校的有关教材和意见,借此,我们向他们表示衷心的感谢!在编写过程中,还得到学校主管教学的校长、教务长和教务处的同志、科大基础物理中心的领导及许多同志的支持、鼓励和帮助,我们谨致以衷心的感谢!

谢行恕教授在百忙中认真审阅了全部书稿,并提出了许多宝贵意见。

参加第一册编写的有:第一章由杜英磊编写;2.1、2.3、2.4、实验 1、10、12、13、15、16、21 由熊永红编写;2.6、实验 2、3、8、9、14、22、23 由钟龙云编写;实验 17、18、20、25 由张希文编写;实验 19、24 由刘慎秋编写。最后由钟龙云负责统编。熊永红在统编和书稿结构的完善中也做了很多工作。承蒙钱临照教授为本书编写序言。同时,在出版过程中,始终得到了中国科学技术大学出版社的支持与合作,在此一并致谢!

由于编者水平有限,又是第一次按层次分册编写,肯定有不足和错误,欢迎使用的师生提出批评建议,以便再版时修改和完善。

编者

1995 年 10 月 10 日

绪 论

一、实验在物理学发展中的作用

前苏联著名化学家涅斯米扬诺夫曾说过,科学是近代技术之基础,物理是现代科学之领袖,物理学何以成为自然科学中的带头学科?何以成为推动科技革命的主要原动力呢?追根寻源,物理实验的作用确实功不可抹。

众所周知,科学实验是整个自然科学的基础,而物理实验在整个自然科学中又起着极其重要的作用。回顾物理学的发展史,我们可以看到,实验和理论是物理学的两大支柱。实验——理论——再实验……的模式是物理学发展所遵循的基本规律。以某些物理现象或实验事实为基础(或为起点),或又受到某些事物的启发,提出物理模型,用以解释过去已有的实验事实,然后再用实验来验证这个模型的正确与否,并根据不断发展的实验技术和实验方法及实验结果来进一步修正和完善它。若新的实验事实与原有模型不符,或新的实验结果推翻原有理论的某些结论或推论,于是便促使新的物理模型和新理论的诞生……实验和理论相互依赖,相互促进,共同缔造着物理王国,并不断向其它学科辐射、渗透成为发展新学科的源泉和推动科学技术革命的动力。第一次产业革命是如此,第二次产业革命亦是如此,今后的发展还将是如此。物理实验的思想方法、仪器和技术已被普遍地应用到自然科学以外的各科学,并且日益广泛地向生产和生活的各个领域渗透、发展和推广应用。

例如:1831年法拉弟的电磁感应现象的发现和1897年赫兹的电磁波实验,就是麦克斯韦电磁场理论的实验基础和理论的验证中最关键的两个实验;1800年杨氏的双缝干涉实验,证明了光的波动学说,赫兹的光电效应的发现,是爱因斯坦光量子假设的实验依据,并最终证明了光的“波粒”二相性;卢瑟福的 α 粒子散射实验,揭开了原子秘密;吴健雄的实验验证了李政道和杨振宁的宇称不守恒定律。对科学技术正在起到巨大作用的新器件、新材料、新技术等(如晶体管、激光器、低温超导、可控热核反应),也都是首先在实验室中研究创造出来的。事实证明,实验工作在物理学各个领域的发展中起着重大的作用,实验室从来就是历史上许多重大技术革命的发源地。

当然,科学实验不应是盲目的,而是具备了进行实验的理论概念之后,为了求证它才去做的。一些实验问题的提出,以及实验的设计、分析和概括也必然要用到现有的理论。因此,在学习物理实验时,要正确处理好理论和实验的辩证关系,要积极主动,动手又动脑,既重视实验技能训练也重视理论的指导作用。

二、物理实验教学的目的和任务

理工科大学的物理实验已发展成为一门独立的科学实验课程,是学生进入大学进行科学实验的入门课,是学生受到系统的实验思想方法和技能训练的开端,也是后续实验课程的

基础。

本课程是在中学物理实验的基础上,按物理实验的不同层次,循序渐进,由简到繁组织教学,物理实验课程教学的目的和任务是:

1. 通过实验要求学生做到:弄清实验原理,了解一些物理量的测量方法;熟悉常用仪器的基本原理和技术性能,正确选择和使用;能够正确记录及处理实验数据,分析判断实验结果;能写出完备实验报告。

2. 培养并逐步提高学生观察和分析实验现象的能力,理论联系实际、进行综合或设计实验的能力,独立进行研究工作的能力。为此,要加强对实验的观察、测量和分析的训练,加深对物理概念、规律和理论的理解和应用,并求逐步提高。

3. 培养及提高学生的科学素质,即严谨的工作作风,严肃认真、实事求是的科学态度,遵守纪律及爱护国家财产的优良品德,刻苦钻研、勇于探索和创新的开拓精神等。

以上三个任务,是物理理论和课堂教学所不能代替的,科学技术工作者,绝大多数是从事实验工作或解决国民经济重大技术问题的,只有具备较为广博的理论知识,系统和扎实的现代科学实验技能,探索求实的开拓精神,才能适应科学技术飞速发展的需要,担负起建设社会主义现代化社会主义祖国的重担。

三、物理实验的基本程序

物理实验虽然有多种类型,但都是在教师指导下,独立进行实验的实践活动,因此,在实验过程中应当发挥学生的主观能动性,有意识地培养他们的独立工作能力和严谨的工作作风,物理实验课的基本程序,可分为如下三个阶段:

1. 实验前预习

仔细阅读实验教材,了解本次实验的原理和方法,并基本了解有关测量仪器的使用方法,在此基础上写出实验的预习报告,预习报告包括:实验名称、目的要求、仪器用具、原理简述(原理、有关定律或公式、电路图或光路图等)。如果是设计性实验,尚需写出设计概要或有关计算结果。

预习时,应以理解原理为主,了解实验中的待测物理量,可能出现的现象,要达到什么目的(求什么或验证什么),以求主动、有目的地操作,克服机械而呆板方式操作。

2. 进行实验

实验时应遵守实验室规章制度,先要阅读有关仪器使用的注意事项或说明书,熟悉仪器,了解原理和用法,调整好仪器或接好电路,经教师检查后再开始做实验。

实验过程中按步骤进行,仔细测量和读数,正确记录数据(单位和有效数字位数)并填入数据表格中,数据记录中,如发现错,可以重新记录,并对原来数据加上特殊符号(如“—”或“×”)。未重新测量决不允许修改实验数据。

将实验记录交教师审核签字后,整理实验仪器,方能离开实验室。整个过程要求保持实验室的整洁、安静、有秩序的环境。

3. 实验报告

实验报告是实验工作的全面总结,要用简明扼要的形式,将实验结果完整而又真实地表达出来,这是进行科学实验素质培养的必要内容之一。

写报告时,要求文字通顺,字迹端正,数据齐全,图表规矩,结果表示正确(包括误差的表示),讨论认真,应该按自己思路来写。

实验报告的格式包括下列几部分:

一、实验名称;

二、实验目的;

三、仪器设备;

四、简要原理(或定律)及计算公式(光学、电磁学等实验,还有光路图或电路图);

五、实验简要步骤和实验数据记录;

六、数据处理(包括计算、图表、误差分析等);

七、实验结果(结论);

八、讨论(或回答)。

实验报告要用正规的实验报告纸来写,原始记录必须附在报告后面一并交教师。

目 录

序	(I)
前言	(III)
绪论	(V)
第一章 测量、数据处理与误差分析	(1)
1.1 测量与误差的基本知识	(1)
1.1.1 直接测量与间接测量	(1)
1.1.2 测量误差	(4)
1.2 误差分析的基本知识	(8)
1.2.1 随机误差的估计	(8)
* 1.2.2 系统误差的处理	(14)
* 1.2.3 粗差的判别和剔除	(17)
1.2.4 仪器和量具的误差估计	(19)
1.3 测量结果的误差估计, 不确定度	(20)
1.3.1 测量结果不确定度、合成不确定度和总不确定度	(21)
1.3.2 直接测量结果的误差估计(合成不确定度)	(21)
1.3.3 间接测量结果的误差估计, 误差的传递与合成	(23)
1.3.4 误差分析的意义	(27)
1.4 测量结果的表示与数据处理	(28)
1.4.1 有效数字与实验结果的表示	(29)
1.4.2 实验函数关系的表达	(31)
1.4.3 图解法求实验方程	(36)
1.4.4 逐差法处理实验数据	(39)
1.4.5 最小二乘法求实验的直线方程	(40)
附录	(47)
第二章 基本物理量的测量	(58)
2.1 物理实验的基本方法	(58)
2.1.1 物理实验方法的兴起和科学实验思想的形成	(58)
2.1.2 物理实验的基本方法	(59)
2.2 时间测量	(67)
引言	(67)
实验 1 时间测量中随机误差的分布规律	(68)
实验 2 示波器的原理及用于时间测量	(74)

* 实验 3 微型计算机在时间测量中的应用	(79)
附录	(83)
2.3 长度测量	(94)
引言	(94)
实验 4 长度测量	(95)
实验 5 相对位移的测量	(102)
附录	(104)
2.4 质量测量	(107)
引言	(107)
实验 6 天平的测量原理及应用	(108)
实验 7 惯性质量的测量	(115)
附录	(120)
2.5 温度测量	(126)
引言	(126)
实验 8 热敏电阻测温度的原理	(126)
实验 9 用热电动势测温度的原理	(130)
实验 10 液体温度计的工作原理和校准	(134)
附录	(138)
2.6 电流测量	(142)
引言	(142)
实验 11 直流电流测量	(143)
附录	(147)
第三章 某些物性和物理规律的研究	(152)
3.1 某些物性的研究	(152)
引言	(152)
实验 12 弹性模量的测定	(152)
实验 13 比热容的测量	(157)
实验 14 用稳恒电流场模拟静电场	(162)
附录	(168)
3.2 某些物理规律的研究	(170)
引言	(170)
实验 15 气垫上的直线运动	(171)
实验 16 碰撞和动量守恒	(176)
实验 17 单透镜实验	(179)
实验 18 组合透镜实验	(183)
实验 19 分光计的调整和测棱镜材料析射率	(186)

实验 20 衍射实验	(194)
附录	(196)
第四章 综合实验与实验设计(I)	(197)
引言	(197)
实验 21 单摆设计	(197)
实验 22 万用表的设计及组装	(198)
实验 23 半导体温度计的设计与制作	(203)
实验 24 光电效应	(207)
实验 25 三维全息照相	(210)
附录	(213)
参考文献	(216)

第一章 测量、数据处理与误差分析

一个物理上可测量的量必须应当具有数值、单位和所表示的数值的可靠性程度(或可置信度),这三者构成了物理量的全部,它们缺一不可。要得到一个可测量的物理量必须通过测量。开尔文(Kelvin)勋爵曾用语言把测量的重要性概括为一门科学的最本质部分,他曾说“假如你能够量度你的东西并能用数量来表示它,你对它就有些了解了;假如你不能够量度它不能用数量来表示它,你对它的知识就是贫乏而不能令人满意的,这也许只是知识的入门,但不管怎样,你的知识还没有提高到科学的程度。”^①可见,测量是非常重要的,通过测量可以得到物理量的数值,但仅仅取得数值是不够的,还必须表示数值的可靠性程度,这一点往往为初学者所忽视,实际上它与物理量的数值和单位同样重要。本世纪初,爱因斯坦发表了广义相对论,为数很少的可以验证这一理论的实验之一就是光线通过很强的引力场时发生的偏折。根据广义相对论理论计算,光线通过太阳附近将发生角度为 1.75 秒的偏折,这将使一些通常被太阳遮住的星星成为可见,这种现象应该在日蚀时可以观察到。三年后,即 1919 年,发生了一次日全蚀,许多科学家都赶到非洲去观察和拍照,借以证实或否定这个理论。结果确定观察到了光线的偏折,且与理论预言相符。但是很多严谨的科学家对这个观察结果的置信程度产生了怀疑,因为通过数据分析得到,实验的误差比 1.75 秒这个数值还要大一些。这就是说,这些测量的置信程度是值得怀疑的^②。

由上面的例子可以看到,测量得到的一个物理量不仅要有量值,而且必须进行数据处理和相应的误差分析,给出它的置信程度。这一过程贯穿在一切科学实验之中。

测量、数据处理和误差分析已发展成为实验科学的一个专门的学科,具有深邃的理论体系和丰富的技术内容。要深入地掌握它、运用它,必须具备深厚的数学物理基础和广博的实验经验。

1.1 测量与误差的基本知识

1.1.1 直接测量与间接测量

1. 物理量

长度、时间、质量、密度、速度、温度、电压、电流、……,一切描写物质状态与物质运动的量都是物理量。这些量都只有通过测量才能确定其量值。所谓测量,就是把确定的待测的物理量直接或间接地与取作标准的单位同类物理量进行比较,得到比值的过程,叫做测量。这个比值就是待测物理量的数值,加上相应的单位就构成了一个完整的“物理量”。

^① 转引自“Laboratory Physics”, H. F. Meiners, W. Eppenstein and K. H. Moore
中译本“普通物理实验”恽瑛等译。

^② 参阅 P. G. Bergmann “Introduction to the Theory of Relativity”
中译本“相对论引论”周奇,郝萃译。

国际上已经对常用的物理量标准作出了统一的规定,如长度、时间、温度、电学量等,附录 1.1 简单介绍了最常用的基本物理量的国际标准。同时,对单位制也作了明确的规定。我国实行的标准单位制是国际单位制(SI),它规定了七个基本单位:长度——米(m)、时间——秒(s)、质量——千克(kg)、电流——安培(A)、热力学温度——开尔文(K)、物质的量——摩尔(mol)和发光强度——坎德拉(cd),还规定了二个辅助单位:平面角——弧度(rad)和立体角——球面度(sr)。其他一切物理量均作为这些基本单位和辅助单位的导出单位。有关内容参阅附表 1.1。

2. 物理量的直接测量与间接测量

测量分直接测量和间接测量两类。所谓直接测量就是把待测的物理量直接地与取作标准单位的同类物理量进行比较,如用米尺测长度,用天平称衡质量,用停表测时间,用电表测电压、电流,用温度计测温度等等。这样测量是直接测量,所获得的物理量是“直接测量(物理量)量”。所谓间接测量是计算由一个或几个直接测量量组成的函数的数值,例如 X 、 Y 、 $\cdots$ 为直接测量量,间接测量量 W 可通过它们之间的函数关系式 $W = f(X, Y, \cdots)$ 来求得。

大量的物理量是间接测量得到的,例如物体的表面积,固体的密度,物体的比热容等等。用单摆测定重力加速度 g 是最简单的间接测量的例子,用米尺测量单摆的摆长 l ,用停表测定单摆的摆动周期 T ,然后通过函数式: $g = 4\pi^2 l / T^2$ 的计算得到。直接测量是获得一切物理量的基础,间接测量依赖于直接测量。但是,并非取作基本单位的物理量在一切情况下都必须是直接测量量,而用导出单位的物理量就必然是间接测量量。在实践中,它取决所使用的测量工具,也还与测量方法有关。例如电阻值的获得可通过欧姆表直接测量得到,也可通过测量其两端的电压(V)和通过的电流(I)由算式 $R = V / I$ 间接得到。

3. 等精度测量与不等精度测量

对某一物理量进行多次测量,而且每次测量的条件都相同(如同一观察者、同一组仪器、同一测量方法和在同样的环境条件下测试等等),测得的数据为 $X_1, X_2, \cdots, X_n$,尽管各次测得的结果不完全相同,但我们没有任何充足的理由来判断哪一次更为精确。这样,我们只能认为这几次测量的精确程度是相同的,于是将这种具有同样精确程度的测量称为等精度测量,这样一组数列称为测量列。在所有的测量条件中,只要有一个发生变化,这时所进行的测量就是不等精度测量。

严格说,在实验过程中保持测量条件完全相同的多次测量是极其困难的,但当某一条件的变化对结果的影响不大,甚至可以忽略时,仍可将此种测量视为等精度测量。在这一章里,我们除了特别指明外,都作为等精度测量来讨论。

4. 测量过程中应注意的几个问题

(1) 测量仪器的量程、精密度和准确度

测量是通过一定的仪器或量具来完成的,随着科学技术的发展,仪器的精度愈来愈高,测量过程愈来愈自动化。但测量仪器毕竟是一种工具,它是针对某一或几个物理量而设计的,每一种类的仪器都有其一定的使用条件、范围和方法。因此,熟悉仪器的性能,掌握仪器的使用方法和准确的读数是完成实验的必要条件。为此,在测量前必须对仪器有足够的了解,这些主要包括:

①量程:仪器的测量范围称为仪器的量程。如 TG328B 分析天平的最大称量是 200 克, UJ36 电位差计的量程是 0—160mV 等等。仪器不容许在超量程下使用,否则会损坏仪器。

②精密度:一个设计合理的仪器,读数的位数多少表明仪器的精密度的高低。如测量长度用米尺(分度值为 1mm)读出为 1.58cm,用游标卡尺(分度值为 1/50mm)可以读出为 1.582cm,而用螺旋千分尺(分度值 0.01mm)来测量,则可读出为 1.5824cm,三者的精密度依次提高。因此,仪器的精密度是指仪器所能分辨物理量的最小值。一般它与仪器的最小分度值一致,此值愈小,仪器的精密度愈高。如螺旋千分尺的最小分度值为 0.01mm,可以认为其分辨率为 0.01mm/刻度,或精密度为 100 刻度/mm。

③准确度:它反映的是测量值与准确值的相对误差的大小,误差愈小愈准确。许多仪器上都标明了仪器的准确度级别。例如:某电压表的表面上标有 0.02 字样就是该电压表的准确度级别。它代表该仪器的基本误差的百分数,级别数越小,准确度愈高。

(2)测量的读数规则

在进行测量时,正确的读数是关键。对不同仪器有多种读数方法,将在今后的实验中介绍,此处指出几条一般的规则:

①一定要把仪器显示的数值如实的、全部的记录下来。包括仪表的量程、分度值和估读数等。所谓“如实地”,就是直接按刻度的标度数字读出来并记录,作为原始数据。读完后再作单位换算。例如,实验中用某一电表进行测量,首先查明分度值为 2.5mA/格,并记下,然后读出指针指出的是多少格,如 31.2 格,……等等,测量完毕后逐个进行换算得到 78.0mA,……等等。这样可以减少差错,也可以留待以后适当时换算(如先求出 10 个读数的平均值后再换算),既省事,又方便。所谓“全部地”,就是把仪器显示的全部有效数字无遗漏地又无虚假地读出来。通常在直接测量时要求估读出量具的最小分格的 1/10—1/2。而估读到 1/100 格是不现实的,如果把上例读数记为 31.23 格,无疑是虚假的。

②若仪表的示值不是连续变化而是以一定的最小步长跳跃变化的,如数字式显示仪表,则谈不上估读,只能记录全部数字。特别要指出的是,有些仪表如停表,虽然也有指针和刻度盘,但指针跳动是以最小分格(1/10 或 1/100 秒)为单位的,因此不能估读到 1 格以下。另一种情况是游标尺,是依靠判断两个刻度中哪条线对齐进行读数的,这时一般应记下对齐线的数值,不进行更细的估读。有时碰巧正好两条线同样地近似对齐,无法判断优劣,这时可读 1/2 格,也可以在读数后加一位数 5。

5. 测量值的确定

(1)直接测量值的确定——算术平均值

为提高测量的可靠程度,常常对同一物理量进行多次测量。如对物理量 X 等精度测量,得到一测量列($X_1, X_2, \dots, X_n$)。一般来说,各次测量值 X_i 并不可能完全一致,而且也不可能判断出哪一次的测量值恰好是真值(实际上,真值一般也是不可知的)。那么,如何确定测量值呢?通常,在测量没有错误及符合统计规律的情况下,可以用测量列的算术平均值 $\bar{X}$ 表示测量的最佳值,即:

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i \quad (1.1.1)$$

不难理解,对于有限次测量,平均值会随着测量次数的不同而有所改变,也会因不同列的测量数据而稍有差别。因此只能“期望”诸测量值的算术平均值是最可信赖值或最佳值。可以证明,当测量次数无限多时,算术平均值将无限接近真值。在数学上,称下式为数学期望:

$$\langle X \rangle = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i \quad (1.1.2)$$

(2)间接测量值的确定

对于间接测量值 $W = f(X, Y, \dots)$, 它由诸直接测量值 $X, Y, \dots$ 所确定。当多次测量时, 有两种可能的情况: ①各直接测量值分别独立地进行测量, 且测量条件变化幅度很小; ②每次都是差不多同时或同一条件下对各量测量一遍, 而每次测量之间又都是相互独立的。严格说来, 在不同的情况下计算间接测量算术平均值的方法是不同的。对情况①, 各直接测量值 $X, Y, \dots$ 是相互独立地进行测量的。因此, 首先分别求出它们各自的算术平均值 $\bar{X}, \bar{Y}, \dots$ 然后将其代入函数关系式 $W = f(X, Y, \dots)$ 中求得 W 的测量值:

$$\bar{W} = f(\bar{X}, \bar{Y}, \dots) \quad (1.1.3)$$

对于情况②, 每一次测量, 得一组 $X_i, Y_i, \dots, (i = 1, 2, \dots, k)$, 相应地有 $W_i = f(X_i, Y_i, \dots)$, 然后以其多次测量算术平均值 $\bar{W}$ 作为测量值。

$$\bar{W} = \sum_{i=1}^K W_i / K = \sum_{i=1}^K f(X_i, Y_i, \dots) / K \quad (1.1.4)$$

通常, 当测量条件没有大幅度变化时, 两种计算方法所得到的结果是极其相近的。所以, 除了测量幅度过大时必须采用式(1.1.4)外, 不论何种情况, 都可以采用较简单的式(1.1.3)来计算。

1.1.2 测量误差

物理实验一般都离不开物理测量, 由于测量仪器、环境条件、实验方法(测量手段与计算方法等)的限制和测量者的观察能力的局限, 实验测量得到的物理量的数值与它的真实值并不一致, 这种矛盾在数值上的表现即为误差。随着科学技术水平的提高和人们的经验、技巧、专门知识的丰富, 误差可以控制得愈来愈小, 但不能使误差降低为零。因此, 实验结果都具有误差, 误差始终存在于一切科学实验过程之中。通常称此为误差公理。

1. 误差的定义

(1)绝对误差

实际测量值 X 与该物理量的客观真值 A 之间的差值为 Δ , 即 $\Delta = X - A$, 称 Δ 为测量值的绝对误差。如果 X 是指针式仪器的示值, 则 Δ 称为示值误差; 如 X 为某一元器件的标称值, 则 Δ 称为标称误差等等。

由于自然界中的一切物体和物质都处于永恒运动中, 因此, 在测量过程中, 自始至终我们都无法知道待测物理量的真值, 所谓真值不过是某种理论、某种模式的推演结果或约定。为此, 我们通常所说的真值有如下三种类型:

①理论值或定义值, 如三角形的三内角和等于 180° 等。

②计量学约定真值: 国际计量大会决议的七种标准(参阅附录 1.1)。

③标准器相对真值: 高一级标准器的误差与低一级标准器或普通计量仪器的误差相比, 为其 $1/5$ (或 $1/3$ — $1/20$) 时, 则可以认为前者是后者的相对真值。如 0.5 级电压表的电压值相对于 1.0 级电压表的电压值而言是真值。用 0.5 级电压表测得某电阻两端的电压值为 1.03V, 而用 1.0 级电压表测得的电压值为 1.05V, 则 1.0 级电压表测得的电压值的误差为 $+0.02V$ 。

(2)相对误差

绝对误差表示方法往往不能反映测量的精确程度, 例如, 测量两个不同物体的厚度, 用最

小分度值为 1mm 的钢直尺测量其中一个物体的厚度为 32.5mm, 误差为 0.2mm。同样, 用最小分度为 0.01mm 的螺旋千分尺测量另一物体的厚度为 0.165mm, 误差为 0.005mm。初看起来, 绝对误差 0.2mm 远大于 0.005mm, 但我们不能说后者的测量精度比前者高, 而恰恰相反。这是因为前者的测量误差对 32.5mm 来说仅占 0.6%, 而后者对于相应的 0.165mm 来说却占 3%。因此, 为了弥补绝对误差的不足, 我们引进相对误差 E_r 。根据所取的相对参考值的不同, 又分为:

① 实际相对误差 = [误差 / 真值] 的百分数, 即: $E_r = (\Delta / A) \times 100\%$ 。

② 标称相对误差 = [误差 / 测量值] 的百分数, 即: $E_r = (\Delta / X) \times 100\%$ 。

③ 额定相对误差 [或称引用误差] = [误差 / 满刻度值] 的百分数, 即 $E_r = (\Delta / X_{\max}) \times 100\%$ 。

由于一般有 $\Delta \ll X$, $X \cong A$, 故前两种误差基本上没有区别, 但与额定相对误差则可能相差较大。因为 $X \leq X_{\max}$, 则有

$$\Delta / A \cong \Delta / X \geq \Delta / X_{\max}$$

一般电工仪表常以额定相对误差的大小来分级。如量程为 150mV 的 0.5 级电压表, 表示测量 150mV 电压以内的任何一个电压时最大的误差 = 0.75mV。用这个电压表测量 100mV 电压时, 其相对误差 $E_r = 0.75\text{mV} / 100\text{mV} = 0.5\% \times 150\text{mV} / 100\text{mV} = 0.75\%$ 。这在使用电工仪表时必须要注意。

电子仪器和元器件一般是用标称相对误差来表示, 如 $100\Omega \pm 5\%$ 等等。对于电子仪器, 因受外部条件影响较大, 要求在使用时必须注意详细阅读说明书。

2. 误差的分类

误差按其性质和来源分为系统误差、随机误差(偶然误差)和粗大误差(粗差)三大类。

(1) 系统误差

定义: 在同一实验条件下多次测量同一物理量, 误差的绝对值和符号保持恒定; 或在条件改变时, 按某一确定的规律变化的误差。

所谓确定的规律是指这种误差可以归结为某一个因素或某几个因素的函数, 这种函数一般可以用解析公式、曲线或数表来表达。例如: 某些电量是频率的函数, 度盘偏心引起的角度的测量误差按正弦规律变化, 尺长是温度的函数等等。由于变化规律的不同又可分为: 恒定系统误差(它包括恒正系统误差和恒负系统误差)和可变系统误差(线性系统误差、周期系统误差和复杂规律系统误差等等)。

系统误差的来源主要来自以下几个方面:

① 理论误差

由于对实验的理论探讨的不够充分, 或者是由于测量原理所依据的理论具有一定的近似性, 从而引起测量结果中引入误差。单摆实验就是一个很好的例子。由于引入了 $\sin\theta \approx \theta$, 得到了单摆周期的简化公式为:

$$T_0 = 2\pi \sqrt{l/g} \quad (1.1.5)$$

它的精确的级数解为

$$T = T_0 \left(1 + \frac{1}{4} \sin^2 \frac{\theta}{2} + \frac{9}{64} \sin^4 \frac{\theta}{2} + \dots \right) \quad (1.1.6)$$

由计算可得到, 当摆幅角为 5° 时, 由式(1.1.5)引入的误差约为 0.05%, 摆幅角愈小, 由理论引