



普通高等院校规划教材

省级
精品课程

大学物理实验

吴俊林 刘志存 / 主编

A photograph of a wind farm at dawn or dusk, with several wind turbines visible against a hazy sky. The foreground shows a road with white guardrails.

College
Physics
Experiment

陕西师范大学出版社



普通高等院校规划教材

大学物理实验

主编 吴俊林 刘志存

编者 史智平 任亚杰 徐子钧 周传献

刘志存 吴俊林

陕西师范大学出版社

图书代号:JC7N0075

图书在版编目(CIP)数据

大学物理实验/吴俊林,刘志存主编. —西安:陕西师范大学出版社,2007.3
ISBN 978-7-5613-3763-9

I. 大... II. ①吴...②刘... 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(2007)第 019648 号

大学物理实验

吴俊林 刘志存 主编

责 任 人	田均利 郭建刚
封面设计	吉人设计
出版发行	陕西师范大学出版社
社 址	西安市陕西师大 120 信箱(邮政编码:710062)
网 址	http://www.snuph.com
经 销	新华书店
印 刷	陕西师范大学印刷厂
开 本	787×1092 1/16
印 张	15
字 数	307 千
版 次	2007 年 3 月第 1 版
印 次	2007 年 3 月第 1 次
书 号	ISBN 978-7-5613-3763-9
定 价	22.00 元

读者购书、书店添货或发现印刷装订问题,请与本社教材中心联系、调换。

电 话:(029)85308697 85307826 85303622(传真)

E-mail:jcc@snnup.net



吴俊林 陕西师范大学物理学与信息技术学院教授，研究生导师；中国高校实验物理教学研究会常务理事；大学物理实验精品课程负责人。

长期从事教学、科研工作，先后主持承担省部级等科研和教学项目12项；在《科学通报》等10余种期刊发表论文50余篇；编写物理实验教材6部；获省部级和学校等奖项16项。

主讲的物理实验课和主持的物理实验中心通过多年的改革和实践研究，凝练的课程内容、课程体系和管理模式形成了改革的主流方向，并获多个奖项：2003年、2006年两度获《教学质量优秀奖》；2006年物理实验中心被评为《省级物理实验教学示范中心》；2006年大学物理实验课被评为省级精品课程。



内 容 简 介

本书依据高等院校非物理专业物理实验课程的基本要求编写。吸收了近年来物理实验课教学的新理念、新方法及课程内容、课程体系不断改革的主流成果。既符合物理实验自身发展规律和知识体系,又适应其他学科发展对物理实验的要求。

全书共四章,39个实验:

第一章 物理实验基本知识。

第二章 基础物理实验(18个)。

第三章 综合提高物理实验(12个)。

第四章 开放与设计性物理实验(9个)。

实验的编排顺序和内容的设计,有宽松的选择余地和灵活的运用空间,可供不同类型院校、不同专业选择。

本书可作为师范类和综合类院校非物理专业物理实验课教材,也可供其他理工科类院校选用。

PREFACE

大学物理实验是理工科学生开设的一门实践性很强的必修课。它的任务是通过实验过程培养学生发现、分析和解决问题的能力,为从事科学研究打下坚实的基础。为此,必须让学生系统地掌握物理实验的基本知识、基本方法和基本技能。同时随着时代的发展,从培养掌握现代科学技术的创新人才的高度出发,必须将新的教学理念、教学方法、教学内容和新的实验技术及科研领域中的新成果在物理实验课中得到反映,使物理实验课教学内容和教学体系的改革融合时代信息,适应时代发展。

本书在编写时力求突出以下特点:

1. 以“加强基础、重视应用、提高素质、培养能力、开拓视野”为指导思想,以培养学生独立实验能力为核心,以提高学生创新意识和创新能力为目标。对课程教学体系、教学内容进行了新的构思与设计,部分实验增加了相关链接,为开拓知识视野、研究探索提供了平台。

2. 打破了以传授知识为中心的传统物理实验教学体系,建立了符合学科自身发展规律和以培养学生创新能力为宗旨的一条主线、多个层次、综合化的新体系。改变了按照力、热、电、光分块编写的传统模式。

3. 从实验内容上,精选了基础实验;综合提高、开放与设计性实验旨在充分发挥学生的积极性、主动性,为个性培养创造一个相对自由、宽松的实验条件和环境,最大限度促进学生实践能力、解决问题能力以及创新思维能力的培养。



PREFACE

4. 注重人文环境熏陶和现代实验技术的引进, 力争缩短基础与应用、教学与科研以及教科书与现代科学技术之间的距离。部分经典实验中, 增加了相关的物理学史料, 注重了人文科学和服务意识的渗透。

参与本书编写的有吴俊林(第一章和实验14、16、17、18、27、28、29、30、31、32、33、37、38、39)、刘志存(实验3、4、5、7、8、10、12、13、20、21、23、25、26、34、35、36及附表)、史智平(实验9、15、22)、任亚杰(实验6、19)、徐子钧(实验1、2)、周传献(实验11、24)。全书由吴俊林统稿。

在编写过程中, 征求了许多兄弟院校从事物理实验教学的一线教师的意见和建议, 参考并吸收了许多兄弟院校的有关资料和经验, 借此表示衷心的感谢。

编 者

2007年3月



目

录



第一章 物理实验基本知识 (1)

- 第一节 绪论 (1)
- 第二节 测量误差的基本知识 (5)
- 第三节 测量不确定度和测量结果的表示 (25)
- 第四节 有效数字及其运算 (30)
- 第五节 实验数据处理的常用方法 (33)

第二章 基础物理实验 (50)

- 实验 1 长度和体积的测量 (50)
- 实验 2 固体和液体密度的测量 (57)
- 实验 3 重力加速度的测定 (62)
- 实验 4 气垫导轨上速度加速度的测量和碰撞 (68)
- 实验 5 测量刚体的转动惯量 (77)
- 实验 6 物体比热容的测定 (81)
- 实验 7 测定液体的粘滞系数 (84)
- 实验 8 测定液体的表面张力系数 (88)
- 实验 9 制流与分压电路 (92)
- 实验 10 元件伏安特性的测量 (108)
- 实验 11 惠斯登电桥测中值电阻 (113)
- 实验 12 模拟法测绘静电场 (118)
- 实验 13 直流电位差计的原理及应用 (122)
- 实验 14 薄透镜焦距的测量及成像规律的研究 (126)
- 实验 15 分光计的调节及三棱镜折射率的测量 (130)
- 实验 16 等厚干涉的应用 (137)
- 实验 17 迈克耳逊干涉仪的调节及光波波长的测定 (141)
- 实验 18 用掠入射法测定物质的折射率 (148)

第三章 综合提高物理实验 (154)

- 实验 19 金属线胀系数的测定 (154)
- 实验 20 材料杨氏模量测定与拉伸规律的研究 (157)
- 实验 21 声速的测定 (163)
- 实验 22 物体惯性质量的研究 (167)
- 实验 23 示波器的原理及应用 (171)
- 实验 24 RLC 串联电路谐振特性研究 (178)
- 实验 25 霍耳效应及其应用 (182)
- 实验 26 磁场分布的测量 (187)
- 实验 27 单缝衍射光强分布及缝宽的测量 (190)
- 实验 28 光栅特性研究及光波波长测定 (194)
- 实验 29 光电效应测定普朗克常数 (197)
- 实验 30 物质旋光性研究 (203)

第四章 开放与设计性物理实验 (207)

- 实验 31 混合物成分的测量 (208)
- 实验 32 弹簧振子运动规律的总结研究 (209)
- 实验 33 液体体胀系数的测定 (211)
- 实验 34 多功能电表的设计与校准 (212)
- 实验 35 热敏电阻温度计的设计和制作 (217)
- 实验 36 电容器电容量的测量设计 (218)
- 实验 37 等厚干涉法测量液体的折射率 (219)
- 实验 38 光学材料色散关系的研究 (220)
- 实验 39 测透明固体的折射率 (221)

附表 (222)



第一章

物理实验基本知识

第一节 绪 论

物理学是自然科学中最重要、最活跃的带头学科之一。物理学的发展不仅在于自身的学科体系内生长和发展出许多新的学科分支,而且它是许多新兴学科、交叉学科和新技术学科的源头和前导。物理学与其他学科的“嫁接”、“交汇”都可能产生巨大的能量,成为推动现代高科技发展和新兴学科诞生的原动力。

物理理论和实验的发展,哺育着近代高新技术的成长和发展。物理实验的思想、方法、技术和装置常常是自然科学研究和工程技术发展的生长点。现代高新技术的发明和突破,无不源于物理学上的重大发现,而高新技术的发展,又不断推动着实验物理研究的手段、方法和设备的发展,大大改变着人类对物质世界认识的深度和广度。一个典型的例子是DNA 双螺旋结构的发现:沃森(生物学家)—克里克(物理学家)的合作与其在学术上的互补促成《核酸的分子结构——DNA 的结构》的诞生,开启了生命遗传之谜的大门,成为 20 世纪生物学上最伟大的成就之一。

物理学本质上是一门实验科学,在物理学的建立和发展过程中物理实验一直起着十分重要的作用。从人们认识客观事物的规律来看,总是先从实验出发,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。三四百年前,伽利略和牛顿等学者,以科学实验方法研究自然规律,逐渐形成了一门物理科学。从此物理学中每个概念的提出,每个定律的发现,每个理论的建立,都以坚实、严格的实验为基础,并且还

要经受实验的进一步检验。所以物理实验是物理学的基础。例如,法拉第于1831年在实验室里发现了电磁感应现象,进而得出电磁感应定律和其他几个实验定律。麦克斯韦系统总结了电磁学的成就,在1864年提出著名的电磁场理论。20几年后,赫兹的电磁波实验又检验和证实了电磁场理论的正确性。麦克斯韦的电磁场理论把电、磁、光三个领域的规律综合在一起,具有划时代的意义。物理实验在物理学自身发展中有着重要的作用,同时在推动其他学科、工程技术的发展中也起着重要的作用。

纵观科学技术的发展史,可以看出每次重大的技术革命都源于物理学的发展。物理学的每一项新突破,都转化为工程技术上的重大变革,继而发展成为新的生产力,推动社会的发展。历史上热力学、分子物理学的发展,使人类进入热机、蒸汽机时代;电磁学的发展使人类跨入电气化时代;哈恩发现了原子核裂变,才有了今天的核动力;现代无线电通信是基于麦克斯韦电磁理论和赫兹的无线电波实验;原子物理学、量子力学的发展,促使了半导体的研究,导致晶体管的出现,才有今天的超大规模集成电路和高速计算机的迅猛发展,使我们进入新的信息时代;激光器的发明,把许多工程技术领域推向完全新的历史阶段等等。这些令人感慨的例子,数不胜数,但都说明了物理学及物理实验对人类社会发展的的重要性。

物理学的整个发展过程,充分表现出理论和实践的辩证关系。在研究物质世界的规律性的过程中,理论研究和实验研究是不可分割的两个方面,它们是相辅相成和相互促进的关系。没有理论指导的实验是盲目的;没有以实验事实为依据的理论是难以置信的。坚持理论联系实际,理论与实践相结合,是优秀科学技术人才必须具备的基本素质之一。

物理实验是自然科学的基础,它反映了理工科实验的共性和普遍性问题。实验物理学不仅是现代新兴学科和高新科技的核心基础,而且对人的科学素质培养也起着极为重要的作用。物理实验课程曾经为培养20世纪的优秀人才做出了卓越的贡献,也必将为培养21世纪的高素质创新人才奠定坚实的基础。

一、物理实验课的目的和任务

大学物理实验课是一门单独开设的实践性很强的课程,它和理论课具有同等重要的地位。实验研究有自己的一套理论、方法和技能。通过本课程的学习使学生了解科学实验的主要过程与基本方法,为今后的学习和工作奠定基础。本课程以基本物理量的测量方法,基本物理现象的观察和物理思想研究,常用测量仪器的结构原理和使用方法为主要内容进行教学,对学生的基本实验能力、分析能力、表达能力和综合运用设计能力进行严格的培养。本课程是对理工科学生进行科学实验基本训练的一门必修基础课,是学生进入大学后接受系统实验方法和实验技能训练的开端。基本实验能力是科学研究的基本功,只有具备熟练扎实的实验基础知识、方法和技能,才有可能在科学研究中做出成绩。在培养既懂理论又会动手,能解决实际问题的高级人才的过程中,大学物理实验课具有独特的、不可替代的重要作用。

开设物理实验课的目的简单说来有以下三点:

1. 学习物理实验的基本知识、基本方法和基本技能。包括学习使用各种测量仪器,学习各种物理量的测量方法,观察分析各种实验现象,还要学习测量误差的理论知识,学会正确地记录和处理数据,正确地表达实验结果,对实验结果进行正确的分析评价等,为以后的科学研究工作或其他科学技术工作打下良好的实验基础。

2. 逐步培养起严肃认真、实事求是的科学态度和工作作风,养成良好的实验习惯。科学是老老实实的学问,来不得半点虚假和马虎。良好的实验习惯是做好实验的重要条件,一旦形成不好的习惯,以后就很难改正。要在每次实验中有意识地锻炼自己。

3. 通过实际的观察和测量,加深对物理理论知识的理解和掌握,同时激发大家对学习物理科学的兴趣。

物理实验课程的具体任务是:

1. 通过对实验现象的观察、分析和对物理量的测量,学习物理实验知识,加深对物理学原理的理解。

2. 培养与提高学生的科学实验能力。

(1) 自学能力:能够自行阅读实验教材和资料,能正确理解原理,作好实验前的准备;

(2) 实践能力:能够借助教材或仪器的说明书,正确使用常用仪器,完成实验操作;

(3) 思维判断能力:能够运用物理学理论对实验现象进行初步分析,作出判断;

(4) 表达书写能力:能够正确记录和处理实验数据,绘制图线,说明实验结果,撰写合格的实验报告;

(5) 简单的设计能力:能够完成综合提高实验和设计性实验;

(6) 创新能力:能够举一反三,灵活运用,有所创新。

3. 培养与提高学生的科学实验素质。要求学生具有理论联系实际和实事求是的科学作风,严肃认真的科学态度,主动研究的探索精神,遵守纪律、团结协作和爱护公共财物的优良品德。

二、基础物理实验课的三个环节

物理实验课是学生在教师指导下独立进行实验的一种实践活动,无论实验内容的要求或研究的对象如何不同,无论采用什么方法,其基本程序大致相同,一般都有三个基本环节:

1. 实验课前预习

物理实验课不同于理论课,做实验前一定要认真预习,预习的好坏直接影响实验的成败,因此,预习是做好实验的基础。预习时首先要仔细阅读教材的有关章节及实验,不能只将实验内容通读一遍,关键是要理解其意。明确实验的目的要求,搞清实验所依据的原理和采用的方法,初步了解所用量具、仪器、装置的主要性能及使用方法,明白如何进行操作,要测量哪些数据,要注意哪些事项。对一时搞不清楚的问题,应做出记录,以便在实验过程中加倍注意,通过实验来解决。

阅读教材后要在规定的实验报告本或报告纸上写出简明扼要的预习报告,设计画好记录原始数据的表格。上课时,教师将通过不同的方式检查预习情况,并作为评定课内成绩的一项内容。对于没有预习的学生,不允许做本次实验。

2. 实验观测

实验课内操作是实验课的关键环节,是学习科学实验知识,培养实验技能,完成实验任务的主要过程。进入实验室要遵守实验室规则。实验前应首先清点量具、仪器及装置有关器材是否完备,然后根据实验内容和测量方法进行合理布局,对量具、仪器及装置进行调整或按电路、光路图进行连接。清楚了解所用仪器的性能、使用方法,牢记注意事项。实验前如有必要应请指导教师检查。实验开始,如果条件允许,可先粗略定性地观察一下实验的全过程,了解数据分布情况,有无异常现象。如果正常就可以从头按步进行实验测试。实验过程中如出现异常情况,应立即中止实验,以防损坏仪器,并认真思考,分析原因,力求自己动手寻找、排除故障,当然也可与指导教师讨论解决。通过实验学习探索和研究问题的方法。

物理实验过程中要仔细观察实验现象,手脑并用,边做实验边思考,做到认真测量如实记录原始数据。实验完毕,原始数据记录经教师检查后,方能归整仪器,离开实验室。

3. 实验报告撰写

实验报告是实验完成后的书面总结,是把感性认识转化为理性认识的过程,是培养表达能力的主要环节。首先应该完整地分析一下整个实验过程,实验依据的理论和物理规律是什么;通过计算、作图等数据处理,得到什么实验结果,有的还要进行科学合理的误差或不确定度估算;有哪些提高;存在什么问题。应该注意的是,写实验报告不要不动脑筋地去抄教材。因为实验教材是供做实验的人阅读的,是用来指导别人做实验的。实验报告则是向别人报告实验的原理、方法,使用的仪器,测得的数据,供别人评价自己的实验结果。认真书写实验报告,不仅可以提高自己写科研报告和科学论文的水平,而且可以提高组织材料,语句表达,文字修饰的写作能力,这是其他理论课程无法替代的。

物理实验报告一般包括以下几项内容:

实验名称

实验目的(或要求)

实验仪器用具

实验原理

简要叙述实验的物理思想和依据的物理规律,主要计算公式,电学和光学实验应画出相应的电路图和光路图。

数据表格及数据处理

把教师签字的原始数据如实地誊写在报告的正文中,写出计算结果的主要过程及误差或不确定度估算过程。进行数值计算时,要先写出公式,再代入数据,最后得出结果。若用作图法处理数据,应严格按作图要求,画出符合规定的图线。

讨论分析小结

讨论分析实验中遇到的问题,写出自己的见解、体会和收获,提出对实验的改进意见等。讨论分析是培养分析能力的重要途径。

回答问题

回答指定的问题。

第二节 测量误差的基本知识

物理学是建立在实验基础上的科学,物理实验离不开对物理量的测量,由于人们认识能力和科学技术水平的限制,使得物理量的测量很难完全准确。也就是说,一个物理量的测量值与其客观存在的值总有一些差异,即测量总存在误差。由于误差的存在,使得测量结果带有一定的不确定性,因此,对一个测量质量的评估,要给出它的误差或不确定度,不知道可靠程度的测量值是没有意义的。本节主要介绍测量误差的基本知识,同时要注意体会误差分析的思想对于做好实验和实验设计的意义。

一、测量与误差

1. 测量及其分类

在物理实验中,不仅要定性的观察各种物理现象,还必须定量的说明物理量的变化规律,为此就需对物理量进行测量。测量是将被测物理量与选作标准单位的同类物理量进行比较的过程。其比值即为被测物理量的测量值,被测量的测量结果用标准量的倍数和标准量的单位来表示。因此,测量的必要条件是被测物理量、标准量及操作者。测量结果应是一组数字和单位,必要时还要给出测量所有的量具或仪器,测量的方法和条件等。

按照测量的方法,可将测量分为两类。一类是可用标准计量仪器直接和待测量进行比较而得到结果的测量,称为直接测量,相应物理量称为直接测定量。如用米尺测得单摆摆线长度为 $L=90.0\text{ cm}$,用停表测量单摆周期 $T=1.91\text{ s}$,用电流表测量线路中的电流等。另一类是被测物理量不能用标准计量仪器直接比较,而需要依据待测量和某几个直接测定量一定的函数关系计算出结果的测量称为间接测量,相应的物理量称为间接测定量。如用单摆测定重力加速度,可在直接测定摆长和周期后,依据公式: $g=4\pi^2 \frac{L}{T^2}$ 计算出测量结果。

如果按测量次数来分类,可将直接测量分为单次测量和多次测量。而根据测量条件有无变化又可将多次测量分为等精度测量和不等精度测量两类。由于所有测量都是依据一定的方法,使用一定的仪器,在一定的环境中,由一定的观察者进行的,所以我们把这一定的测量方法、仪器、环境和观察者统称为条件,如果多次测量时,每次的测量条件都完全相同(同一方法、同一仪器、同一环境、同一观察者),则这种测量称为等精度测量,测得的一组数据称为测量列。如果在多次重复测量过程中,有一个或几个条件发生了变化,则这种测量称为非(不)等精度测量。物理实验中尽量采用等精度测量。

2. 测量误差及其分类

(1) 真值与测量值

任何一个物理量在确定条件下客观存在的、也就是实际具备的量值称为真值。例如,

某一物体在常温条件下具有一定的几何形状及质量。真值是一个比较抽象和理想的概念,一般来说不能确切知道这个值。真值包括理论真值(如三角形内角和之和恒为 180°)和约定真值(如指定值、标准值、公认值及最佳估计值)等。

通过各种实验所得到的量值称为测量值,多是仪器或装置的读数或指示值,测量值是被测量真值的近似值。包括:①单次测量值,②算术平均值,③加权平均值等。

(2) 测量误差

每一个物理量在一定条件下具有的客观大小称为物理量的真值。进行测量的直接目的就是力图获得待测量的真值。但是由于测量条件的不完善,如实验理论的近似性实验仪器灵敏度和分辨能力的局限性及环境的不稳定性等因素的影响,任何测量结果和待测量的真值间总有差异,这种差异在数值上的表示称为误差。误差自始至终存在于一切科学实验和测量过程中,测量结果都存在误差,这就是误差公理。

任何测量所得数据,都不可避免地要出现误差,因而没有误差的测量结果是不存在的,在误差必然存在的情况下,测量的任务是:第一,尽量设法减小误差。第二,求出待测量的最近似真值,并估算其误差。为此,必须研究误差的性质、来源及其对测量结果的影响,以便采用适当措施,得到最准确的结果。

(3) 测量误差的分类

按照测量过程中误差的性质和所产生原因,可将误差分为系统误差、随机误差(偶然误差)及粗大误差三大类。实验数据中三种误差是混杂在一起的,但是由于不同性质的误差对测量结果的影响不一样,因而对它们的处理方法也不相同,我们可根据这一基本特点,分别讨论三者的变化规律,研究其对结果的影响,以便采用相应的措施减少误差。

① 系统误差:在相同条件下(方法、仪器、环境、人员)多次重复测量同一量时,误差的大小和符号(正、负)均保持不变或按某一确定的规律变化,这类误差称为系统误差。它的特征是确定性。前者称为定值系统误差,后者称为变值系统误差。

系统误差的来源有以下几方面:

1) 仪器误差:这是由于仪器或装置的缺陷或未按正常工作条件操作使用所造成的误差。例如,刻度不准、零点没有调准、仪器垂直或水平未调整、砝码未经校正等。

2) 方法(理论)误差:由于实验方法不完善或这种方法所依据的理论本身具有近似性所产生的误差。例如:称重量时未考虑空气浮力、采用伏安法测电阻时没有考虑电表内阻的影响等。

3) 环境误差:这是由于环境的影响或没有按规定的条件使用仪器所引入的误差。例如:标准电池是以 20°C 时的电动势数值作为标准的,若在 30°C 条件下使用时,不加以修正,就引入了系统误差。

4) 主观误差:这是由于实验者生理或心理特点,或缺乏经验引入的误差。例如:有人习惯于侧斜视读数,就会使估读的数值偏大或偏小。此种误差因人而异。

系统误差的消除、减小或修正可在实验前、实验中、实验后进行。例如:实验前对测量仪器进行校准,使方法完善,对实验人员进行专门的训练等等;实验中采取一定的方法对系统误差加以补偿;实验后在结果处理中进行修正等等。

虽然系统误差的发现、消除、减小或修正是一个技能问题。但是，要找出原因，寻求其规律决非轻而易举之事。这是因为：

第一，实验条件一经确定，系统误差就获得了一个客观上的恒定值，在此条件下进行多次测量并不能发现该系统误差。

第二，在一个具体的测量过程中，系统误差往往会和随机误差同时存在，这给分析是否存在系统误差带来了很大困难。

能否识别和消除系统误差与实验者的经验和实际知识有密切关系。因此对于实验初学者来说，从一开始就逐步地积累这方面的感性知识，在实验时要分析采用这种实验方法（理论）、使用这套仪器、运用这种操作技术会不会给测量结果引入系统误差。如果找到了某个系统误差产生的原因，掌握了它的变化规律，就可采用不同的方法去消除它的影响，或者对测量结果进行修正。

科学史上曾有这样一个事例。

1909~1914 年间美国著名物理学家密立根以他巧妙设计的油滴实验，证实了电荷的不连续性，并精确地测得基本电荷量

$$e = (1.591 \pm 0.002) \times 10^{-19} \text{ C}$$

后来，由 X 射线衍射实验测的 e 值与油滴实验值之差了千分之几。通过查找原因，发现密立根实验中所用的空气粘度数值偏小，以致引入系统误差。在重新测量了空气的粘度之后，油滴实验测得到

$$e = (1.601 \pm 0.002) \times 10^{-19} \text{ C}$$

它与 X 射线衍射法测得的结果 $(1.60217733(49) \times 10^{-19} \text{ C})$ 十分吻合。

此例说明了实验条件一经确定，多次测量（密立根曾观察了几千个带电油滴）发现不了系统误差。必须要用其他的方法（本例中改变了产生系统误差根源的条件）才可能发现它；同时也说明了实验应该从各方面去考虑是否会引入系统误差，当忽略某一方面时，系统误差就可能从这一方面渗透到测量结果中去。

② 随机误差（偶然误差）：在测量时，即使消除了系统误差，在相同条件下多次重复测量同一量时，每次测得值仍会有些差异，其误差的大小和符号没有确定的变化规律。但如大量增加测量次数，其总体（多次测量得到的所有测得值）服从一定的统计规律，这类误差称为随机误差，它的特征是偶然性。

随机误差产生的原因很多。主要是由于测量过程中存在许多难以控制的不确定的随机因素引起的。这些随机因素有空气的流动，温度的起伏，电压的波动，不规则的微小振动，杂散电磁场的干扰，以及实验者感觉器官的分辨能力、灵敏程度和仪器的稳定性等等。某一次测量的随机误差往往是由多种因素的微小变动共同引起的。如用停表测量三线摆的周期，按下按钮的时刻有早有迟，动作迟早的程度有差异，从而产生了不可避免的随机误差。

实践和理论都证明，在相同条件下，对同一物理量进行大量次数的重复测量，可以发现大部分测量的随机误差服从统计规律。统计规律用分布描述，分布常用图形表示，其中最常见的是高斯分布，又称正态分布。它的特征为：