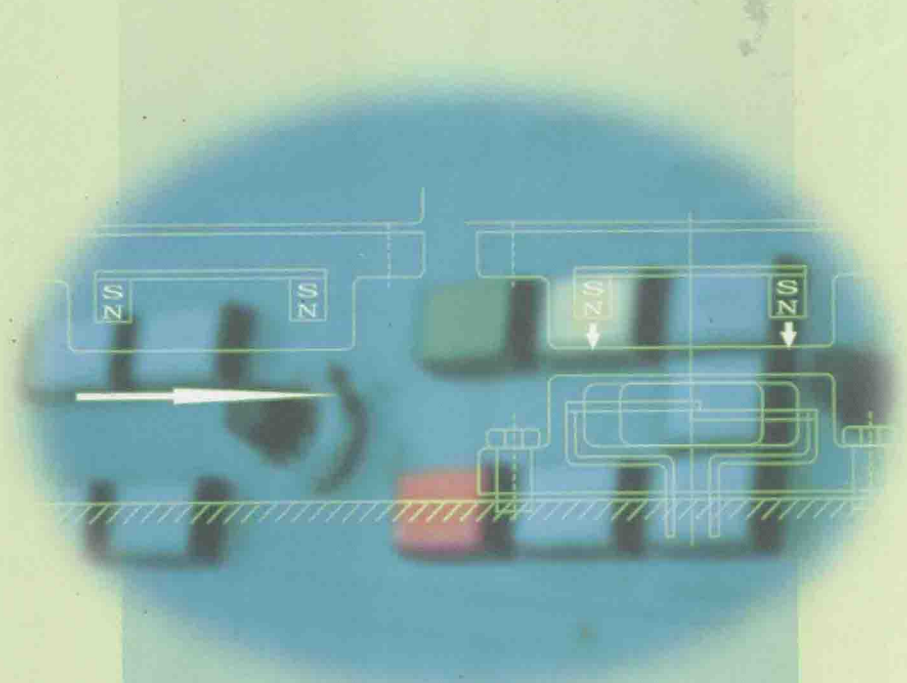




全国高等农业院校教材
全国高等农业院校教学指导委员会审定

大学物理实验

侯双印 主编



中国农业出版社

全国高等农业院校教材
全国高等农业院校教学指导委员会审定

大学物理实验

侯双印 主编

中国农业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

大学物理实验 / 侯双印主编. —北京: 中国农业出版社, 2005. 2

全国高等农业院校教材

ISBN 7-109-09606-8

I. 大... II. 侯... III. 物理学-实验-高等学校-教材
IV. O4-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 006786 号

中国农业出版社出版

(北京市朝阳区农展馆北路 2 号)

(邮政编码 100026)

出版人: 傅玉祥

责任编辑 朱 雷

中国农业出版社印刷厂印刷 新华书店北京发行所发行

2005 年 2 月第 1 版 2005 年 2 月北京第 1 次印刷

开本: 787mm×960mm 1/16 印张: 14

字数: 246 千字

定价: 19.30 元

(凡本版图书出现印刷、装订错误, 请向出版社发行部调换)

内 容 简 介

本教材是根据教育部颁发的综合性大学非物理专业物理实验大纲的基本要求，结合作者多年物理实验教学实践编写的，主要包括测量不确定度及数据处理基础、力学、热学、电磁学、光学、近代物理、综合性及设计性实验等内容，并配有适当的习题与思考题。教材内容不仅满足当今人才培养的要求，又考虑到实验设备的更新换代，适合高等农林院校各专业作为物理实验教材或参考书。

编写人员

主 编 侯双印

参 编 (以姓氏笔画为序)

王保柱 付三玲 刘书华 刘东州

刘立芳 谷延霞 宋建民 侯志青

高保山 郭 卫 康艳霜

设备调试 刘明典

主 审 董燕南

前 言

本教材是依照教育部颁发的综合性大学非物理专业的物理实验大纲以及作者多年的物理实验教学实践编写的。它不仅可作为理工类非物理专业学生的物理实验教材，也可供农、林、医各专业的学生使用。

大学物理实验是理科学生必修的一门课程。它的任务是通过实验教学培养学生的综合能力，这也是在当今高科技时代，高校培育大批高素质创新人才对物理学实验提出的必然要求。为此，必须让学生系统地学好并掌握物理实验的基本知识、基本方法和基本技能。只有打好这一基础，才能为培养高质量人才提供保证。

在实验内容的改革方面，结合具体的实验学时数和未来发展，我们对大学物理实验的题目和内容进行了全面、细致地审视。从培养目标出发，重新进行构思和精选实验内容。坚决淘汰陈旧、过时的实验内容、实验方法和实验手段，保留了在物理学科有代表性的、有活力的实验项目，补充了一些有应用价值、先进的实验内容、实验方法和实验手段。例如，为加强定量测量，加进了传感器的应用内容；为开拓学生的思维，还加进了部分综合性、设计性项目。

为了使学生能系统地掌握物理实验的基本知识和基本方法，本书将实验中有关的必要知识集中在测量不确定度及实验数据处理基础一章中做了叙述。其中测量不确定度及数据实验处理基础是物理实验课的重要教学内容，本书在这一章中用了较多的篇幅进行介绍，并且在不同的实验题目中对测量不确定度的估计和数据处理方法及测量结果的表示提出了不同的要求。

本教材在第五章编入了一些综合性、设计性实验题目。对设计性实验，提出了实验要求，并由实验室提供有关仪器用具；而实验原理及具体实验步骤则由学生自己通过查找资料和阅读参考书，并根据已掌握的物理实验基本知识和基本方法独立进行设计。该实验项目虽然有些难度，但通过教师的指导和学生的努力是可以完成的。设计性实验的实践表明，它对提高学生的实验素质、培养独立工作能力很有帮助，这也是目前高校实验课所提倡的。考虑到物理实验课要求学生独立阅读教材，本课程承担着培养学生自学能力的任务，我们在编写时力求做到了每个实验都有明确的实验目的，使学生容易掌握重点。仪器介绍及实验原理的叙述突出实验设计思路和实验方法。此外，每个实验教材的后面都提供若干个思考题。其中，有些题目是为促进学生积极思考、加深理解而

设计的，而有些题目则是为帮助学生掌握重点而提供的。

提高实验课的质量应从实验室的硬件建设和教材建设共同抓起。在编写本实验教材前，我们对实验仪器和实验设备的购置计划就做了精心的安排，从硬件上奠定了良好的基础。本书是由集体合作编写而成的，但整体上贯穿着同一个共识，就是努力提高学生的综合能力。在整体框架与构思确定的基础上，具体内容个人分工负责撰写。具体编写分工如下：

侯双印：前言、绪论、第一章、§3-2、§3-3、§4-4、§4-6、§5-2、§5-4、§5-5、§5-7及书后的附录；高保山：§2-8；王保柱：§3-4、§3-5、§5-6；刘书华：§2-6、§2-10、§4-2；郭卫：§3-1、§3-6、§3-7；宋建民：§2-5、§2-9；付三玲：§4-3；刘东州：§2-2、§2-3；侯志青：§2-4、§2-11；刘立芳：§2-1、§4-5；康艳霜：§2-7、§5-3；谷延霞：§4-1、§5-1；刘明典在实验预做、新设备调试方面做了大量工作；刘立芳、刘东州做了许多前期准备工作；最后由侯双印对全书文稿格式进行了统一修订，为每个实验加了序，对部分实验用图做了修整，补充了部分思考题，对测量的不确定度的估计、数据处理方法及实验结果的表达形式等根据不同的实验做了具体要求和安排。

众所周知，实验室建设（包括教材建设）是一项凝聚集体劳动的工程。我们在编写本教材时，吸收了河北农业大学物理实验室几十年来在基础物理实验室工作的许多同志的智慧及成果，同时我们也参考了兄弟院校的有关教材。本书初稿完成后，董燕南先生仔细审阅了书稿并提出了许多宝贵意见；本书的出版，得到河北农业大学教务处教材科、理学院的大力支持。在此，我们一并表示衷心的感谢！

由于时间短促，书中难免有缺点和错误，敬请读者批评指正。

编者

2004年10月

目 录

前言

绪论..... 1

第一章 测量不确定度及实验数据处理基础..... 4

§ 1—1 测量误差及其分类..... 4

§ 1—2 系统误差的发现与消除 11

§ 1—3 直接测量结果及其不确定度 17

§ 1—4 间接测量结果及不确定度的合成 26

§ 1—5 有效数字及其运算 35

§ 1—6 测量数据处理方法 40

习题 50

第二章 力学、热学实验 54

§ 2—1 基本度量 54

§ 2—2 用扭秤测定水的表面张力系数 60

§ 2—3 用硅压阻力敏传感器测定液体的表面张力系数 65

§ 2—4 用落球法测量液体的黏滞系数（光电计时） 68

§ 2—5 用拉伸法测定钢丝的杨氏模量 72

§ 2—6 刚体的转动实验 78

§ 2—7 简谐振动实验 85

§ 2—8 空气摩尔热容比 γ 值的测定 88

§ 2—9 用悬丝耦合弯曲共振法测定钢丝的杨氏模量 91

§ 2—10 空气相对压力系数的测量 96

§ 2—11 用落球法测定液体的黏滞系数（手动计时） 102

第三章 电磁学实验 106

§ 3—1 用电位差计测量电动势 106

§ 3—2 示波器的工作原理和使用 109

§ 3—3 非平衡电桥测温仪实验 124

§ 3—4	模拟法测绘静电场	126
§ 3—5	霍耳效应元件测磁场	131
§ 3—6	螺线管内部磁感强度测定	137
§ 3—7	温差电动势的测定	142
第四章	光学实验	147
§ 4—1	单狭缝衍射实验	147
§ 4—2	用衍射光栅测定光的波长	150
§ 4—3	用牛顿环测量透镜的曲率半径	155
§ 4—4	迈克尔逊干涉仪的调整和使用	159
§ 4—5	照相技术	163
§ 4—6	旋光仪工作原理及使用	168
第五章	近代物理与综合性、设计性实验	172
§ 5—1	光电管特性的研究	172
§ 5—2	塞曼效应实验	176
§ 5—3	利用超声波测定声速	182
§ 5—4	温度传感技术实验研究	187
§ 5—5	非平衡电桥测温仪设计与应用	191
§ 5—6	用超声光栅测声速	195
§ 5—7	测量未知电阻（设计性实验）	202
附录 I	常用物理数据表	203
附录 II	国际单位制简介	211
参考文献	213

绪 论

一、物理实验课的地位

物理学是自然科学中的一门重要学科。物理规律的研究与形成是以严密的实验事实为基础的，从本质上说物理学是一门实验科学。物理实验不仅在物理学的建立与发展过程中一直起着重要作用，而且在今后进一步探索尤其是在新科技领域的开拓与创新过程中仍然是必需的手段和强有力的工具。物理实验课与理论课之间有着密切的内在联系，但是作为大学物理实验，是并列于理论课而单独开设的一门课程。它具有独立的教学目的、教学内容及教学方法。通过大学物理实验，不仅加深了对物理知识的理解，而且更重要的是使学生掌握一定的实验知识，并在实验方法和实验技能方面得到较为系统、严格的训练。对培养和提高学生的综合素质，树立科学的实验观，物理实验起着潜移默化的作用。因此，对高等学校理、工、农、林、医各类专业的学生来说，上好物理实验课是非常重要的。

二、物理实验课的教学目的

在教师的指导下，通过对物理实验现象的观察以及对物理量的测量与分析，使实验者做到：

1. 理论联系实际，加深对物理概念和物理规律的理解。
2. 培养和提高科学实验能力。其中包括：①能够通过阅读实验教材或相关资料，写出预习报告，做好实验前的准备；②能够通过阅读仪器说明书或者相关资料掌握正确的测量方法和正确使用仪器；③能够运用物理的理论分析实验中观察到的现象；④能正确记录和处理实验数据，正确表达实验结果并对实验结果进行正确地分析与评价，撰写出合格的实验报告，为以后的科学研究工作或其他科技工作打下良好的实验基础。
3. 培养严肃认真、实事求是的科学工作态度和坚忍不拔、勇于探索的工作作风，养成遵守纪律、团结协作、爱护公物的优良品德。

三、物理实验课的三个主要环节

要上好一次物理实验课以达到实验课的目的，必须做好下面三个环节的工作：

1. 预习 每次实验前要做好课前预习。即通过仔细阅读实验教材或相关资料，明确本次的实验目的，弄清实验原理和实验方法，知道实验要求和特别注意事项并写出实验预习报告。对一些设计性实验要在查阅参考资料的基础上，写出自己的实验方案。这一环节是决定实验能否主动、顺利进行的关键一步，必须认真对待。

2. 操作 学生进入实验室后要遵守实验室规则。在教师的指导下认识和熟悉实验所用仪器或用具，并记录仪器的规格型号。掌握正确使用仪器的方法，牢记实验中应注意的事项。然后有条理地布置安装仪器（或连接好电路等）使之处于最佳工作状态。按实验步骤，在明确每一步操作意义的前提下认真安全地操作，要注意观察实验中出现的一切现象，善于思考和钻研实验中出现的问題，遇到异常情况要主动地请教老师，在老师指导下努力排除出现的故障（不要盲目处理），正确记录实验数据。这一环节重点放在培养和提高自己的实验能力上，是学习、锻炼的良好机会，千万不要一味追求测量数据，这一点一定要引起同学们的重视。但是，所测实验数据在一定程度上反映客观实际，要严肃对待，不能随意涂改。如确实为笔误，也应轻轻划掉，在旁边记录正确值。实验结束时，实验数据经老师审阅签字，再将仪器还原整理好。

3. 总结 实验结束后，要对测量的数据按要求进行及时处理，写出实验报告。数据处理过程包括对原始数据整理、列表、计算、作图、误差分析等。表格设计制作要规范，不仅便于自己分析和查找，又能使别人看懂。作图要按照作图规则进行，图像要清晰美观。根据具体要求对测量数据进行误差分析，最后写出一份文字简练通顺、字迹清晰、数据齐全、图表正确规范、有见解的实验报告。能客观准确地报告自己的工作成果是对大学生的基本要求也是每一位科技工作者必备的能力。

实验报告的内容包括：

- ①实验名称。
- ②实验目的。
- ③实验仪器（含型号、名称、规格）。

④实验原理。简要叙述实验相关内容（含电路图、光路图等）及测量中所依据的主要公式，列出公式成立所满足的实验条件，各量的单位。

⑤数据表格及数据处理。把记录数据完整地填入设计好的表格中，并完成具体计算，根据要求进行误差分析，写出实验结果。对于用图示法表示测量结果的实验要绘制出图像。

⑥小结或讨论。该项内容不作具体限制，可以是对所发现的具体现象进行分析；对实验方法的见解或者是实验中的收获和体会；也可以是回答思考题等。对一些问题的讨论应有根有据，言语中肯，切忌面面俱到，华而不实。

第一章 测量不确定度及实验 数据处理基础

绪论中已谈到物理学是建立在实验基础上的科学。物理实验包括两方面内容：一是定性观察物理现象；二是定量测量物理量的大小，通过进一步研究建立物理规律。

所谓测量，就是将待测量与同类标准量进行比较，以确定待测量是多少。但是，任何测量结果与被测量的真值之间都存在差异，也就是说在任何测量过程中，都不可避免地出现测量误差^①。误差存在的必然性和普遍性，已被长期的科学实验所证明。对误差研究的深入程度反映着人们对客观世界的认识程度。随着科学技术的发展、测量手段的不断更新以及人们认识水平的不断提高，人类对客观世界的揭示愈来愈深刻，将测量误差控制得愈来愈小。而完全消除误差却始终没有做到。

将含有误差的测量数据进行数据加工，才能求得被测量的最佳逼近值，并估计其准确程度。

本章将对测量误差与测量不确定度的基本概念和测量数据的处理过程进行讨论与研究。

§ 1—1 测量误差及其分类

一、测 量

(一) 直接测量与间接测量

凡是由计量仪器直接读出测量结果，称为直接测量。如用米尺测长度，用天平称质量，用伏特表测电压，用特斯拉计测磁感强度等。

凡是不能直接用计量仪器将待测量的大小测出来，而是由几个直接测量值代入某函数关系式后求出待测量，则该待测量的测量称为间接测量。如通过测量圆柱体的高度和直径计算其体积，通过测量电流、电压计算电阻或电功率等。

^①1986年中国计量科学研究院参照国际计量局的意见，规定在测量及检定工作中应采用“不确定度”代替“误差”。本教材从习惯考虑在相关叙述中仍沿用“误差”一词，但在最终表示中使用“不确定度”。

一个物理量能否直接测量不是绝对的。随着科学技术的发展，测量仪器的改进，很多原来只能间接测量的量，现在变得可以直接测量了。比如电能的测量本来是间接测量，也可以用电度表直接测量。

物理量的测量，绝大部分是间接测量，但直接测量是一切测量的基础。

(二) 等精度测量与不等精度测量

任何物理量的测量可由某一观察者使用一定的仪器，通过一定的方法，在一定的环境下去完成。如测某物理量 X ，由同一观察者、使用同一仪器、在同一环境下、以同一种测量方法重复测量 n 次，其测量值分别为 x_1, x_2, \dots, x_n ，我们没有理由认为其中的某一个值比其他值更准确或更不准确。因此，在测量条件完全相同（即同一观察者、同一仪器、同一方法、同一环境）情况下的重复测量称之为等精度测量。

当测量条件不同（如观察者不同，或仪器不同，或方法不同，或环境不同）的情况下对同一物理量进行测量，各次所得值的准确度是不同的，我们称测量条件不同的多次测量为不等精度测量。比如用千分尺和游标卡尺测同一圆柱体的高度，因为两仪器的精度不同，所测结果为不等精度测量。

需要指出的是：重复测量必须是重复进行测量的整个操作过程，而不是仅为重复读数。比如用游标卡尺重复测量圆柱体高度 5 次，每次测量都必须用卡尺重新卡住圆柱的某一位置，然后读数，而不是卡住同一位置不动，重复读数 5 次。

(三) 测量仪器

仪器是进行测量的必要工具。熟悉仪器性能，掌握仪器的使用方法及正确进行读数，是每个测量者必备的知识。

1. 仪器精密度 是指仪器的最小分度相当的物理量。仪器最小分度愈小，所测物理量的位数愈多，仪器精密度愈高。如具有毫米分度的米尺，其精密度为 1 mm；千分尺的精密度为 0.01 mm，最小步进为 0.1 Ω 的旋转式标准电阻箱，其精密度为 0.1 Ω 。

2. 仪器准确度 是指仪器测量读数的可靠程度。它一般标在仪器上或写在说明书上。如电学仪表所标示的级别就是该仪器的准确度。对于没有标明准确度的仪器，可粗略地取仪器最小分度值的一半。因为制造仪器时，其分度值是受仪器准确度约束的。

3. 量程 指仪器所能测量的物理量最大值与最小值之差，即仪器的测量范围。测量过程中，超过仪器量程使用仪器是不允许的，否则易造成仪器的损坏。

关于测量读数最小一位的取值，一般来说应在仪器最小分度内估读一位数字。

二、测量误差的定义

(一) 绝对误差

某被测量的测量值 x 与该被测量的真值 X_0 之差 Δx ，称为测量误差（又叫真误差），即

$$\Delta x = x - X_0 \quad (1-1-1)$$

所谓真值，是指在一定的时间及空间（位置或状态）条件下，某被测量所体现的真实数值。一般情况下，理论真值是未知的。人们进行测量时总是希望能得到被测量在测量条件下的真值。然而，这是不可能的。因为进行测量，是根据一定的理论，使用一定的仪器，在一定的环境中通过观察者去完成的，而测量条件总与理论有差距，仪器总与国际规定标准有偏离，环境总不能完全稳定，人的观察能力也总是有限的，所以一切测量值总是偏离真值。在实际工作中，常用高一级标准仪器的测量值 A_0 来代替真值 X_0 。例如，0.1 级电流表所指示的电流值，相对于 2.5 级电流表的指示而言，即可认为是被测电流的相对真值。通常，高一级标准器的误差与低一级标准器或普通仪器的误差相比，为其 $1/5$ （或 $1/3 \sim 1/10$ ）时，即可认为前者的示值是后者的相对真值，这时，公式（1—1—1）可改写为

$$\Delta x = x - A_0 \quad (1-1-2)$$

式中， x 为普通仪器或低一级标准器的示值， A_0 为高一级标准器的示值（相对真值）。式（1—1—1）和式（1—1—2）所表达的误差是和被测参数具有相同单位（量纲）的，它的大小表示测量值偏离被测参数真值的程度，称此为绝对误差。

(二) 相对误差

对于同等大小的被测量，测量结果的绝对误差愈小，说明其测量精确度愈高。而对于不同等大小的被测量，却不能只凭绝对误差来评定其测量的精确度。在这种情况下，需采用相对误差的形式来说明测量精确度的高低。相对误差没有量纲，通常以百分数表示。

1. 实际相对误差 实际相对误差是指绝对误差 Δx 与被测量的真值 X_0 的百分比，记为

$$E = \frac{\Delta x}{X_0} \times 100\% \quad (1-1-3)$$

2. 示值相对误差 示值相对误差是指绝对误差 Δx 与仪器的示值 A 的百分比，记为

$$E_A = \frac{\Delta x}{A} \times 100\% \quad (1-1-4)$$

示值相对误差一般用于误差较小时，此时由于仪器的示值 A 与被测量的真值 X_0 很接近，故 E_A 与 E 相差很小。

(三) 归算误差

为便于比较不同示值范围的仪表的测量精度，通常将绝对误差 Δx 折合成仪表示值范围（即量程） B 的百分误差来表示，并称之为归算误差（或称相对百分误差），即：

$$E_m = \frac{\Delta x}{B} \times 100\% \quad (1-1-5)$$

式中，仪表的量程 B 等于仪表的满刻度值与刻度下限值之差。若刻度下限值为零，则上式便可写成绝对误差与仪表满刻度值之比，这便是有的书籍中所定义的引用误差。工业检测仪表的精度等级通常以最大归算误差来评定。

三、测量误差的来源与分类

(一) 误差的来源

在测量过程中，产生误差的原因是多种多样的。一般可归纳为如下几类：

1. 测量装置误差

(1) 标准器件误差。标准器件是提供标准值的量具。如标准量块、标准刻度线尺、标准电阻、标准电池和标准砝码等。它们本身体现的量值并非真值，不可避免地含有误差。因此以它们为基准制造和校准的仪器或仪表也就含有误差。

(2) 仪器误差。是指测量中所用仪器或仪表本身示值所含误差。

测量装置误差一般表现为：结构误差，如等臂天平的不等臂、米尺刻度的不均匀、机械零件连接的间隙等所造成的误差；调整误差，如水平、铅直、同心、零点等没有调整到理想状态所造成的误差；变形误差，如仪器或仪表在长期的使用过程中的磨损、变形、老化等所造成的误差。

2. 环境误差 由于各种环境与规定的标准状态不一致而引起的测量仪器或被测物理量产生变化所造成的误差。如温度、湿度、气压、振动、电磁场、重力场等等与规定的测量条件不相符而造成的误差等。

3. 方法误差 由于测量的方法或依据的理论不严密而造成的误差。如伏安法测电阻时采用电流表内接或外接时电表内阻的影响；用高灵敏度的分析天平称衡低密度物体的质量时没有考虑空气浮力的影响；单摆测重力加速度实验

中摆球不是质点造成的误差；单缝衍射采用近似公式等给测量造成的误差。

4. 人员误差 这是由于观测者的主观因素，如分辨能力、生理习惯、反应速度、测试经验、精神状态等原因造成的误差。比如按停表，有人常常过早或过迟；估计电表读数末位时，习惯性偏大或偏小等。

在评价测量结果的误差时，要对误差的来源作全面的分析，既不遗漏，又不重复，以便找出重要因素，略去次要因素。这样得出的测量结果才是正确可信的。

(二) 误差的分类

根据测量误差的性质，可将其分为以下三类：

1. 系统误差（简称系差） 在等精度条件下，对同一物理量进行多次测量，其测量误差的大小和符号保持恒定，或在条件改变时，误差的大小和符号按某一确定规律变化，这种误差称为系统误差。

系统误差还可以按下列情况细分：

(1) 按掌握的程度分，有：

已定系差：误差的大小和符号均已知。如千分尺的零点读数。

未定系差：误差的大小和符号至少其一为未知，但通常可以估计出误差范围。如测量仪器说明书给出的误差限值。

(2) 按变化规律分，有：

恒定系差：误差的大小和符号不变化，为固定值。

变值系差：误差的大小和符号至少其一是变化的，变化规律可为线性变化、周期性变化和复杂变化。

上面讨论过的几类产生误差的因素，都可能引起系统误差。但系统误差总是由一些确定的因素引起的，它使测量结果具有固定的倾向。在测量中可以修正的系差只有已定系差。对于未定系差可以用改变测量条件或测量方法来减小或消除，如后面要讲的代替法、抵消法、交换法、半周期法等，但不能用多次测量的方法来减小或消除。总起来说，系统误差可以完全消除或减少到人们可以接受的程度。当然实际测量工作中，要发现系统误差的存在，弄清产生的原因，消除或减小它对测量结果的影响，是一项非常复杂的工作。它需要丰富的实践经验和一定的物理知识并付出艰苦细致的劳动，然而这也是物理实验观测者的一项重要任务。

2. 随机误差（偶然误差） 即使实验中已理想地消除了系统误差，在同样的条件下，由同一观测者，应用同一仪器，以同样的方法（等精度！）重复测量同一物理量，测得数值也总有差异。某一次测量的误差以不可预定的方式变化，有大有小，有正有负。称这种在相同条件下多次测量同一量时，误差的大