



新世纪高等学校教材

DAXUE WULI SHIYAN JIAOCHENG

大学物理实验教程

王铁云 主编



北京师范大学出版集团
BEIJING NORMAL UNIVERSITY PUBLISHING GROUP
北京师范大学出版社

新世纪高等学校教材

04-33
344

大学物理实验教程

DAXUE WULI SHIYAN JIAOCHENG

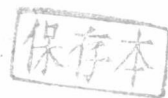
主 编◎王铁云

副主编◎琚爱堂 阎元红 张 清

编 委◎雒卫廷 辛俊丽 高 雁

冯晋军 药树栋 孙 祝

姚 斌 逯美红



北京师范大学出版集团
BEIJING NORMAL UNIVERSITY PUBLISHING GROUP
北京师范大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

大学物理实验教程 / 王铁云主编. —北京: 北京师范大学出版社, 2011.7

(新世纪高等学校教材)

ISBN 978-7-303-12868-6

I. ①大… II. ①王… III. ①物理学—实验—高等学校—教材 IV. ①O4-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 087611 号

营销中心电话 010-58802181 58808006
北师大出版社高等教育分社网 <http://gaojiao.bnup.com.cn>
电子信箱 beishida168@126.com

出版发行: 北京师范大学出版社 www.bnup.com.cn
北京新街口外大街 19 号
邮政编码: 100875

印刷: 北京中印联印务有限公司
经销: 全国新华书店
开本: 170 mm × 230 mm
印张: 15
字数: 258 千字
版次: 2011 年 7 月第 1 版
印次: 2011 年 7 月第 1 次印刷
定价: 25.00 元

策划编辑: 范林 责任编辑: 范林
美术编辑: 毛佳 装帧设计: 毛佳
责任校对: 李茵 责任印制: 李啸

版权所有 侵权必究

反盗版、侵权举报电话: 010-58800697

北京读者服务部电话: 010-58808104

外埠邮购电话: 010-58808083

本书如有印装质量问题, 请与印制管理部联系调换。

印制管理部电话: 010-58800825

内容提要

本书根据教育部 2008 年制定的《理工科类大学物理实验课程教学基本要求》，结合新建本科院校数学、计算机、电子、机械、化学化工等理工科非物理专业大学物理实验教学基本要求，在大学物理实验教学改革实践成果(山西省高等学校教学改革项目)的基础上编写而成。

全书分六章，包括物理实验测量误差与数据处理的基本知识、物理实验的实验方法与基本技术、前导实验、基础性实验、综合性实验、设计性实验。本书简要地介绍了大学物理实验的测量误差、不确定度、数据处理的基本知识，分四个层次安排了 52 个实验项目，根据专业特点和开放式实验教学的要求，可按专业教学计划规定的实验总课时选做实验项目。

本书可作为地方新建本科院校、师范院校等理工科非物理专业大学物理实验课程的教材或参考书，也可供涉及物理学的广大科技工作者参考。

前 言

本书根据教育部高等学校物理基础课程教学指导分委员会制定的《理工科类大学物理实验课程教学基本要求》(2008年版),结合新建本科院校理工科非物理专业大学物理实验教学特点,在大学物理实验教学改革实践成果(山西省高等学校教学改革项目)的基础上编写而成。

本书内容共六章,包括物理实验测量误差与数据处理的基本知识、物理实验的实验方法与基本技术、前导实验、基础性实验、综合性实验、设计性实验。书中简要地介绍了大学物理实验的测量误差、不确定度、数据处理的基本知识与物理实验的基础知识,分四个层次编排了52个实验项目,根据专业特点和开放式实验教学的要求,可按不同专业的教学计划组织教学、选做实验项目。

根据实验教学改革的需要,本书的编写有以下几个特点:

(1)在实验项目的编排上,改变了按力、热、电、光实验顺序编排内容的方式,按照分层次教学的基本要求,以及由浅入深、循序渐进的原则进行分类,按前导实验、基础性、综合性、设计性实验体系安排章节,以适应多层次实验教学模式,使不同层次学生的实验能力得到充分的训练与提高。

(2)在实验项目的选取及内容处理上,注意选取培养学生动手能力、科学思维和创新意识和创新能力效果较好的项目,有的项目列出了不同的实验方法,有的项目采用了当代科学研究与工程技术中广泛应用的现代物理技术。在52个实验项目中有20个设计性实验,以便各校在使用本书时根据本校的实验条件与实际情况进行选择。

(3)在实验项目内容的编写中,力求做到目的明确,注重实验能力的培养;实验原理叙述清楚,着重实验思路的引导,突出了解决问题的方法与过程;实验仪器的选用注意通用、典型;实验步骤由详到简,引导学生积极思考;每个实验的后面都列有思考题,以便学生对实验项目的进一步巩固,提高综合实验能力。

(4)在培养学生的基本科学实验技能方面,为了使学生能系统地接受实验方法和实验技能的训练,掌握常用的实验操作技术与实验研究的基本方法,培养学生基本科学实验技能,提高学生科学实验的基本素质,使学生初步掌握实验科学思想和方法。本书将物理实验的基础知识单独设立一章,分节阐述了实验的基本测量方法、实验的基本操作技术,以及力、热、电、光各学科的实验基础知识。

物理实验教学是一项集体性工作,从实验仪器的选择、材料的配制,到实验项目的编排与实验内容的编写,都需要全体教师的智慧及长期的共同努力,本书的编写是集体劳动的成果,是编者几十年物理实验教学经验的总结,更是近年来物理实验教学改革的体现。本书由王铁云、琚爱堂、阎元红、张清、锥卫廷、辛俊丽、孙祝、药树栋、高雁、姚斌、冯晋军、逯美红等编写。全书的策划、框架结构、统稿和定稿由王铁云负责,并担任主编。其中第1章由王铁云编写;第2章由王铁云、阎元红编写;第3章由阎元红、锥卫廷、辛俊丽、冯晋军编写;第4章由王铁云、琚爱堂、张清、孙祝、辛俊丽、姚斌、药树栋、冯晋军编写;第5章由王铁云、阎元红、高雁、琚爱堂、孙祝、姚斌、锥卫廷、逯美红编写;第6章由王铁云、琚爱堂、阎元红、张清、药树栋、高雁、逯美红编写。编写过程中我们还参阅了许多兄弟院校的有关教材、著作和文章,吸取了宝贵的经验,在此表示诚挚的感谢和敬意。

本书在编写过程中,得到了教育部物理教学指导委员会委员、博士生导师、中北大学校长贾锁堂教授热忱的关心和支持,也得到了参编作者所在院校领导和同行的支持和帮助,同时还得到了北京师范大学出版社范林编辑的支持和帮助,在本书出版之际,编委会全体成员真诚地向他们表示由衷的感谢。

由于编者水平所限,书中难免存在缺点和错误之处,恳请广大读者批评指正。

编者
2011年6月

目 录

绪 论 /1

第 1 章 物理实验误差与数据处理 /3

- 1.1 测量与误差 3
- 1.2 偶然误差的估算 6
- 1.3 间接测量的误差传递与合成 9
- 1.4 测量的不确定度 11
- 1.5 有效数字及其运算规则 16
- 1.6 系统误差的发现和消除 19
- 1.7 误差计算与测量仪器、测量条件的
选择 21
- 1.8 实验数据处理方法 23
- 1.9 实验报告 30

第 2 章 物理实验基础知识 /34

- 2.1 物理实验的基本测量方法 34
- 2.2 物理实验的基本操作技术 39
- 2.3 力学、热学实验基础知识 41
- 2.4 电磁学实验基础知识 45
- 2.5 光学实验基础知识 51

第3章 前导实验/55

实验 1	基本测量	55
	(一)长度测量	55
	(二)密度的测定	62
实验 2	在气垫导轨上测速度和加速度	66
实验 3	万用电表的使用	71
实验 4	用惠斯登电桥测电阻	77
实验 5	薄透镜焦距的测量	82

第4章 基础性实验/87

实验 1	单摆法测重力加速度	87
实验 2	碰撞实验	91
实验 3	拉伸法测金属丝的杨氏弹性模量	94
实验 4	刚体转动惯量的测定	98
	(一)用三线摆测刚体的转动惯量	98
	(二)用刚体转动实验仪测转动惯量	102
实验 5	液体黏滞系数的测定	107
	(一)用落球法测定液体的黏滞系数	107
	(二)用转动法测定液体的黏滞系数	109
实验 6	金属比热容的测定	113
实验 7	空气压强温度系数的测定	117
实验 8	水的汽化热的测定	120
实验 9	空气比热容比的测定	123
实验 10	静电场的模拟	126
实验 11	用电位差计测电源电动势	130
实验 12	示波器的原理与使用	134
实验 13	交流电路功率因素与三相交流电	142
实验 14	用冲击电流计测电容	147
实验 15	棱镜玻璃折射率的测定	150
实验 16	用牛顿环测透镜的曲率半径	155

实验 17	单缝衍射	159
-------	------------	-----

第 5 章 综合性实验/163

实验 1	金属杨氏模量的动态法测定	163
实验 2	用超声波测量声速	166
实验 3	液体表面张力系数的测定	169
实验 4	用双臂电桥测低电阻	173
实验 5	RCL 串联电路的稳态特性	178
实验 6	用衍射光栅测光波波长	183
实验 7	偏振现象的研究	185
实验 8	用迈克尔逊干涉仪测光波波长	190
实验 9	光电效应法测普朗克常数	195
实验 10	密立根油滴法测电子电荷	200

第 6 章 设计性实验/205

实验 1	不规则固体密度的测定	206
实验 2	用落体法测量重力加速度	207
实验 3	在气垫导轨上测量重力加速度	207
实验 4	简谐振动的研究	208
实验 5	驻波法测波长与振动频率	209
实验 6	固体线胀系数的测定	210
实验 7	热敏电阻开关的设计	211
实验 8	测量温度传感器的温度特性	211
实验 9	电表的改装设计与校验	212
实验 10	滑线变阻器特性的研究	214
实验 11	小灯泡伏安特性曲线的研究	215
实验 12	伏安法测非线性电阻	215
实验 13	电位差计校准电表与电阻的测定	216
实验 14	用测距显微镜测透明介质的折射率	217
实验 15	望远镜和显微镜的组装	217
实验 16	汞光谱色散曲线的研究	218

实验 17	用干涉法测微小量	219
实验 18	用衍射法测细丝的直径	220
实验 19	钠黄双线波长差的测定	220
实验 20	用迈克尔逊干涉仪测定空气的折射率	221

附录一 国际单位制简介 /223

附录二 常用物理常数表 /224

表 1	基本物理常数表	224
表 2	在20 °C时常用固体和液体的密度	225
表 3	标准大气压下不同温度时水的密度	225
表 4	在海平面上不同纬度的重力加速度	226
表 5	水在不同温度时的黏度	226
表 6	蓖麻油在不同温度时的黏度	226
表 7	水在不同温度下与空气接触的表面张力系数	227
表 8	在20 °C时与空气接触的液体表面张力系数	227
表 9	在20 °C时金属的弹性模量	228
表 10	某些物质中的声速	228
表 11	常用光源的谱线波长	229
表 12	某些液体相对于空气的折射率($\lambda=589.3 \text{ nm}$)	229
表 13	某些晶体相对于空气的折射率(18 °C)	230
表 14	金属和合金的电阻率及温度系数	230

绪 论

1. 大学物理实验的地位和作用

物理学是建立在实验事实基础上的科学，从本质上讲它是一门实验科学。物理学中概念的确立和物理规律的发现，都必须以严格的科学实验为依据。例如，重力加速度的概念、电磁感应定律、光的波粒二象性等，都是人们通过长期观察自然现象、反复实验、运用抽象思维的方法总结出来的。

大学物理实验是一门实验基础课，是理科各专业实验的重要基础。为了培养学生用实验方法研究问题和解决问题的能力，学生在实验中必须接受实验思想、实验方法、实验技能和实验数据处理等方面的基本训练。应该认识到大学物理实验不仅仅是验证已学过的理论知识，还要认识到它的实验设计指导思想、实验方法、手段也具有基本的应用价值。学好大学物理实验能够为今后的实际工作奠定良好的基础。

2. 大学物理实验的教学目的

(1)通过实验，学生能够掌握实验的基本知识、基本原理、基本方法和基本实验技能，培养独立工作的能力和发现、分析、判断、处理问题的能力。

物理实验是非常细致和复杂的工作。在实验设计、实验操作、仪器使用、数据处理和误差计算等方面，都有大量的实际知识。例如，利用天平怎样称衡，电表怎样使用，显微镜怎样看，线路怎样连接，光路怎样调整，数据怎样记录等，都是最基本的东西，只有掌握了这些基本技能，才能适应以后实际工作的需要。

(2)在实验过程中，学生通过对实验现象的观察和分析，对重要的物理概念和规律树立直观、清晰的物理图像，并能运用物理学原理、物理实验方法研究物理现象和规律，加深和巩固所学的物理学理论知识，培养理论与实际相结合的能力。

(3)通过实验，培养严肃认真的工作作风和实事求是的科学态度。严谨的工作作风和科学态度，是进行实验工作所必须具备的科学素养和思想品德。

(4)通过实验，培养遵守纪律、爱护公共财物的优良品德和团结协作、共同探索的合作精神。

3. 大学物理实验的教学程序和要求

大学物理实验课是在教师指导下由学生独立完成的课程。因此在整个教学过程中, 应该有意识地培养学生独立工作的能力, 要求学生认真细致地进行实验, 耐心地分析问题。大学物理实验课的教学程序一般可以分为下列三个阶段。

(1) 实验前的预习

实验前的预习是做好实验的前提。通过阅读实验讲义和必要的参考书, 弄清本次实验的目的、要求、基本原理和实验方案的思路, 对实验步骤要有一个总体的观念。如观察什么现象, 测量哪些物理量, 怎样进行测量等。在此基础上写出预习报告。预习报告包括实验名称、目的、仪器、原理(及计算公式)、数据表格、实验步骤提纲等, 还可写出没有搞清楚的问题。某些实验的预习可到实验室面对实验装置进行, 切不可简单照抄实验讲义。

(2) 实验操作

进入实验室后, 要自觉遵守实验室的规则, 认真听取教师的讲解和要求, 然后认识和熟悉仪器, 了解仪器的使用方法及注意事项, 最后进行正确的调整和使用。

实验要按步骤进行, 并能较好地控制整个实验过程和物理现象, 认真观察现象, 正确记录数据。发现了错误数据应及时改正, 但不允许涂改, 更不能用橡皮擦去。正确的方法是在错误的数字上轻轻画一斜线, 并在旁边写上正确的数据(留下错误的数字, 对以后分析测量结果可能有一定的参考价值)。

实验过程中若有仪器损坏或出现故障, 要及时请教教师, 不得随意处理。实验完毕, 测量结果要经教师审阅认可后方可结束实验, 再将仪器整理复原, 养成良好的实验习惯。

(3) 书写实验报告

具体内容见 1.9。

第1章 物理实验误差与数据处理

物理实验不仅要定性地观察与研究自然现象，而且要定量地测量有关的物理量以及它们之间的数量关系，通过对测量数据进行误差分析和数学处理，可科学地评价测量值接近于客观实际的程度。如果要深入地讨论误差理论，需要有丰富的实践经验与较多的数学知识。这里仅简单介绍一些关于误差的基础知识，着重了解它的物理思想，学会误差计算，领会误差分析对做好物理实验的意义。

1.1 测量与误差

1.1.1 测量

在物理实验中，要用实验的方法研究各种物理规律，总离不开对各种物理量的测量，通常测某一物理量就是借助仪器的某一计量单位把待测量的大小表示出来。即待测量与规定作为标准单位的同类物理量进行比较，其倍数即为待测量的测量值，这一比较过程叫做测量。规定的物理量为标准量。

测量又可分为直接测量和间接测量两类。用量具或仪表直接读出测量值的，称为直接测量，相应的物理量称为直接测得量。但对于大多数物理量来说，没有直接读数用的量具，只能用间接的方法进行测量。例如，测量重力加速度时，可以用米尺量出单摆的摆长 l ，用停表测出单摆的周期 T ，然后代入公式 $g = 4\pi^2 l / T^2$ 可计算出重力加速度。像这类测得量是由几个直接测得量经过物理公式计算得出的称为间接测量，相应的物理量称为间接测得量。

1.1.2 测量误差

任何测量都不可能进行得完全准确，在同一情况下，无论选择怎样良好的实验方法和提高实验技术，以及选用最精密的仪器，但测量的结果总有一定的不准确性。也就是说测量的结果都必然包含着误差。

如果用 x_0 表示被测量的客观真值，用 x 表示实际测量得到的测量值，则差值

$$\Delta x = x - x_0 \quad (1.1.1)$$

就定义为测量的绝对误差。由式(1.1.1)可知，误差可以是正值或负值。

例如，一个物体的真实长度为 8.25 cm，而测量结果为 8.23 cm，则测量误差为 -0.02 cm；另一个物体的真实长度为 2.50 cm，而测量结果为 2.52 cm，则测量误差为 0.02 cm。用绝对误差来评价，一个测得值小了 0.02 cm，一个测得值大了 0.02 cm，好像两个长度的测量准确程度相当，其实不然。很显然，评价一个测量结果的准确程度不但要看误差的绝对大小，而且还要看被测量本身的大小。于是，我们定义出相对误差的概念，即

$$E_r = \frac{\Delta x}{x} \times 100\% \quad (1.1.2)$$

由式(1.1.2)可算出第一个测量： $E_r = -0.02/8.25 = -0.24\%$ ；而第二个测量： $E_r = 0.02/2.50 = 0.8\%$ 。这就很明显地说明，第一个测量要比第二个测量准确程度高。由此可知，对于相同的被测量，绝对误差可以评价其测量准确度的高低。但对于不同的被测量，绝对误差就难以评价其测量准确度的高低，而采用相对误差来评价较为确切。

所谓真值是指在一定的条件下，被测量所具有的客观真实数值。真值是一个理想的概念，一般是不知道的，能知道的只是测量值。因而以上关于误差的定义还不能用于实际中去。于是，人们就建立起误差理论，用来科学地估算测量误差。

根据误差产生的原因和性质，可分为系统误差、偶然误差和粗大误差三类。

(1) 系统误差

在同一条件(观测者、所用仪器、测量方法和环境条件不变)下，多次测量同一物理量时，误差的绝对值和符号保持恒定，或在条件改变时按一定规律变化的误差，称为系统误差。

系统误差产生的原因主要有以下几个方面：(1)由于测量仪器本身的缺陷而造成的误差。例如，千分尺零点读数不是零；水银温度计的零度不是在水的三相点温度；天平两臂不等长等。(2)对实验理论探讨不充分，对某些影响实验结果的因素考虑不周密。例如，测量热量时，没有考虑量热器与周围空气的热交换；研究磁针的偏转时，没有考虑环境磁场的影响；测量电流强度时，没有考虑电路中电池的电压随放电时间的延长而降低等。(3)由于观测者生理或心理特点造成的。例如，有人估计读数总是偏小(或偏大)等。

消除系统误差一般是对仪器进行校正，改进实验方法或在计算公式中引入合理的修正系数，以改正某些因素对实验结果的影响。例如，实验中的散热、温度变化引起的电阻变化，电表内阻的影响引起的测量误差，它们的共同特点

总是偏向真值的一边。用 x' 代表实际的测量值，引入修正量 S ，于是系统误差修正后的测量值应为：

$$x = x' - S \quad (1.1.3)$$

式中的 S 可正可负，当实际测量值大于真值时 S 为正，反之 S 为负。实际上引入修正量 S 后已确定了它的正负。经这样修正后，系统误差的影响就不会带到实验中来，或者说对实验结果的影响就会变小。

(2) 偶然误差

在同一条件下，对同一物理量进行多次测量时，在极力消除和改正一切明显的系统误差之后，每次测量结果都出现一些不可预测的、无规律的起伏，出现的误差时大时小、时正时负，没有确定的规律，这种误差称为偶然误差。

偶然误差来源于多种因素的微小扰动。例如，仪器仪表中传动部件的间隙和摩擦，连接件的变形等引起的示值不稳定；观测时目的物对得不准，平衡点确定得不准，读数不准确；实验仪器由于环境温度、湿度、电源电压的起伏而引起的微小变化；振动、噪声的影响等。这些因素的影响一般是微小的，并且是混杂出现的，因此难以确定某个因素产生的具体影响的大小，所以对待偶然误差不能像对待系统误差那样找出原因进行排除。

由于偶然误差有时正时负、时大时小的特征，导致了它们的和有正负相消的机会，随着测量次数的增加，误差的平均值趋于零。因此，多次测量的平均值的偶然误差比单个测量值的偶然误差小，故多次测量的算术平均值最接近于真值。

(3) 粗大误差(过失误差)

明显歪曲实验结果的误差为粗大误差。也就是说，不能用测量时的客观条件解释为合理的那些突出的误差。这是观测者在测量时对错了标志，读错了数，记错了数，以及在测量时，因操作不小心而引起的过失性误差。如果出现粗大误差，可分析原因，将异常数据剔除。

误差在一定的条件下可以相互转化，对于某一具体误差，在此条件下为系统误差，而在另一条件下可能为偶然误差，反之亦然。实验时，测量的一切数据都包含有一定的误差，没有误差的测量结果是不存在的。在误差必然存在的前提下，测量的任务是：(1)设法将测得值中的误差减至最小；(2)求出在测量条件下，被测量的最可信赖值(最佳值)；(3)估计最可信赖值的可靠程度(即接近真值的程度)。

1.1.3 测量的精度

精度又称为精确度，它用来描述测量结果与真值的接近程度。从实际测量

中知道, 系统误差越大, 则被测量的测量结果对其真值的偏离也越大, 即两者的接近程度越小, 反之则越大。通常将系统误差的大小作为反映准确度高低的定量指标。如测量仪器的示值误差, 反映了仪器的示值与被测量实际值的差值, 可见示值误差主要反映测量仪器的准确度。对同一被测量进行多次测量, 各测量值之间的接近程度, 反映了偶然误差的影响程度。所以, 在测量中偶然误差越大, 则多次测量同一被测量时所得的各次测量值相互之间的偏离也越大, 即越分散, 表明测量值的精密度越低。

准确度和精密度是分别对系统误差和偶然误差的描述, 精确度概括了准确度、精密度两方面的含义, 它反映了系统误差与偶然误差的综合效果。也就是说, 只有系统误差和偶然误差都较小, 才能说精确度高。对于具体的测量, 精密度高的准确度不一定高, 准确度高的精密度不一定高, 但精确度高, 则准确度与精密度都高。

准确度、精密度和精确度三者的含义, 可用如图 1.1.1 所示的打靶时子弹落在靶心周围的三种情况来说明。(a) 的系统误差小, 击中点较分散, 但准确度高, 精密度低; (b) 的偶然误差小, 精密度高, 但是不准, 所有击中点偏离靶心的距离较远, 系统误差较大, 准确度低; (c) 的偶然误差和系统误差都小, 即精确度高。

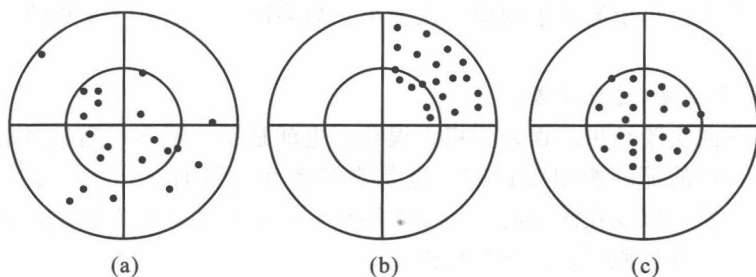


图 1.1.1

1.2 偶然误差的估算

1.2.1 偶然误差的统计规律

假定系统误差已消除, 在相同的条件下, 对某物理量进行多次重复测量, 其结果互有差异, 这就是由偶然误差引起的。在取得大量数据后, 便能发现偶

然误差遵循一定的统计规律。这种统计规律具有以下特性：

- (1)单峰性：绝对值小的误差出现的概率比绝对值大的误差出现的概率大。
- (2)对称性：绝对值相等的正误差和负误差出现的概率近似相等。
- (3)有界性：在一定的测量条件下，误差的绝对值不会超出一定的界限。即绝对值很大的误差出现的概率为零。
- (4)抵偿性：偶然误差的算术平均值随着测量次数的增加将趋近于零。即

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta x_i = 0 \quad (1.2.1)$$

由偶然误差的特性可知，增加测量次数可减小测量结果的偶然误差，算术平均值的误差将随着测量次数的增多而减小，算术平均值趋近于真值。所以，取算术平均值作为测量的最可信赖值。

1.2.2 直接测量结果误差的估算

(1)测量列的算术平均值

为了减小偶然误差，在可能的情况下，对同一物理量一般要求测量多次，多次测量同一物理量所得到的一组数据称为测量列，并将多次测量值的算术平均值作为测量结果。

设 x_1, x_2, \dots, x_n 为 n 次测量的结果，其算术平均值为

$$\bar{x} = \frac{1}{n} (x_1 + x_2 + \dots + x_n) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (1.2.2)$$

由于实验时用算术平均值 \bar{x} 代替真值 x_0 ，所以由式(1.1.1)可知：

$$v_i = x_i - \bar{x} \quad (1.2.3)$$

式中， x_i 为第 i 个测得值； v_i 为 x_i 的剩余误差。由偶然误差的特性可知，剩余误差的代数和为零。

(2)标准偏差

由于偶然误差的存在，等精度测量列中每个测得值一般都不相同，它们围绕着算术平均值有一定的分散，其分散程度说明了单次测量值的不可靠性，所以必须用一个数值来表示单次测量值不可靠性的评定标准。

在现代科技测量中，通常用标准偏差 s_x 来评定偶然误差，在等精度测量列中单次测量的标准偏差 s_x 由下式计算。

$$s_x = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{\sum v_i^2}{n-1}} \quad (1.2.4)$$

式(1.2.4)称为贝塞尔公式。