



面向 21 世纪 课 程 教 材
Textbook Series for 21st Century

普通物理学实验

陈德万 李光林 主编

中 国 农 业 出 版 社

面向 21 世纪课程教材

Textbook Series for 21st Century

普通物理学实验

陈德万 李光林 主编

中国农业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

普通物理学实验 / 陈德万, 李光林主编. —北京: 中国农业出版社, 2004.8

面向 21 世纪课程教材

ISBN 7-109-08960-6

I. 普... II. ①陈...②李... III. 普通物理学-实验-高等学校-教材 IV. O4-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 066798 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 薛 波

中国农业出版社印刷厂印刷 新华书店北京发行所发行

2004 年 8 月第 1 版 2004 年 8 月北京第 1 次印刷

开本: 787mm×960mm 1/16 印张: 15.25

字数: 268 千字

定价: 20.80 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

本书为陈德万主编的面向 21 世纪课程教材《普通物理学》的配套实验教材。精选了力学、热学、电磁学和光学等 41 个实验,其中基础实验 25 个,综合性实验 8 个,设计性实验 8 个。基础实验、综合性实验的实验原理叙述清楚,计算公式推导完整,实验步骤简明扼要。每个实验后面有思考题供学生预习或小结之用。为了便于各院校使用,有的实验介绍了两种或两种以上方法及有关的实验仪器、设备,既照顾了目前大多数学校的现有设备,又注意了易于购买和制作。书中还介绍了实验规则、有效数字、数据处理等,书末附有和实验有关的物理常数。

本书可作为农林类、工程类等专业的普通物理学实验教材。

主 编 陈德万(西南农业大学)
李光林(西南农业大学)

参 编(按姓氏笔画排序)

王开明(四川农业大学)

王化忠(云南农业大学)

孔维姝(贵州大学)

叶才秋(四川农业大学)

牟波佳(西南农业大学)

李 萍(江西农业大学)

周 兵(云南农业大学)

审 稿 郑瑞伦(西南师范大学)

中国农业大学出版社

前 言

本教材为陈德万主编的面向 21 世纪课程教材《普通物理学》的配套实验教材。

物理学是整个自然科学的基础,是培养学生科学素质和科学思维方法,提高学生科学研究能力的重要基础课。而物理实验是物理教学中十分重要的必不可少的教学环节。它对培养学生严谨的科学态度,理论联系实际、实事求是的工作作风和独立工作能力、设计能力、创新能力,以及爱护国家财产、遵守纪律的优良品德,都起着十分重要的作用。为此,我们根据自己在农业院校长期讲授普通物理学实验的经验编写了此教材。

为了适应 21 世纪注重对学生科学素质和创造能力培养的需要,更好地发挥物理学在农林、生物科学中的基础作用,我们在编写中,注意增加了一些结合生物和土壤方面的物理实验,全书分为基本实验、综合性实验、设计性实验等三类,共计 41 个。在基本实验、综合性实验中,实验原理叙述清楚,计算公式推导完整,实验步骤简明扼要。设计性实验中增加了设计性、探索性、创造性的内容,以强化和提高学生理论联系实际的能力、设计能力、实验能力、操作能力、分析问题和解决问题的能力。

考虑各院校课时不同、实验室条件不同,我们编写的实验个数较多,且有些实验用了两种或两种以上不同的实验方法,以便供各院校选择。

本书由四川农业大学王开明、叶才秋,贵州大学孔维姝,云南农业大学周兵、王化忠,江西农业大学李萍,西南农业大学陈德万、李光林、牟波佳编写,陈德万、李光林任主编。西南师范大学郑瑞伦教授仔细审阅了书稿,提出了不少宝贵意见,在此,编者表示衷心感谢。

书中缺点和错误之处,恳请读者批评指正。

编 者

2004 年 2 月

目 录

前言

绪论 1

一、物理实验课的地位和作用 1

二、大学物理实验课的基本要求 1

三、大学物理实验课的程序 2

第一章 误差理论 4

§ 1.1 测量与误差 4

§ 1.2 算术平均值与误差的估算 6

§ 1.3 有效数字及其运算法则 12

§ 1.4 实验数据处理 14

第二章 基本实验 23

§ 2.1 长度测量 23

§ 2.2 液体黏滞系数的测定 29

I. 用落球法测定液体的黏滞系数 29

II. 用奥氏黏滞计测定液体的黏滞系数 32

III. 用落针法测定液体的黏滞系数 36

§ 2.3 刚体转动惯量的测定 41

I. 用三线扭摆法测定刚体的转动惯量 41

II. 用 JM-3 转动惯量实验仪测定刚体的转动惯量 45

§ 2.4 霍尔位置传感器法测定杨氏模量 52

§ 2.5 驻波 57

I. 固定弦振动实验仪的研究 57

II. 用电振音叉测定弦的振动频率 61

§ 2.6 液体表面张力系数测定 63

§ 2.7 空气 γ 值的测定 66

I. 用气压计测定空气 γ 值	66
II. 用硅压力传感器测定空气 γ 值	69
§ 2.8 热不良导体导热系数的测定	73
§ 2.9 万用电表的使用	77
§ 2.10 惠斯登电桥测电阻	81
§ 2.11 电子示波器的原理和应用	88
§ 2.12 用模拟法测绘静电场	96
§ 2.13 常用电器的安装	102
§ 2.14 电子束实验仪的使用	109
§ 2.15 电子荷质比的测定	115
§ 2.16 放大器特性研究	119
§ 2.17 霍尔效应法测量磁场	124
I. 霍尔效应法测量螺线管磁场	127
II. 霍尔效应法测量电磁铁磁场	129
§ 2.18 用示波器测绘铁磁材料的磁化曲线	133
§ 2.19 分光计的调整与使用	138
§ 2.20 用牛顿环测量凸透镜的曲率半径	147
§ 2.21 薄透镜焦距的测定	151
§ 2.22 用光电池测定单缝衍射的光强分布	157
§ 2.23 用衍射光栅测光波波长	160
§ 2.24 光的偏振	164
§ 2.25 光电效应及普朗克常数的测定	171
第三章 综合性实验	179
§ 3.1 声波的观察及波长测定	179
§ 3.2 土壤水势的测定	181
§ 3.3 电表的改装	186
§ 3.4 温差电动势的测定和热电偶温度计的标定	190
§ 3.5 摄影与暗室技术	194
§ 3.6 全息摄影	200
§ 3.7 利用光电效应测定植物叶片面积	205
§ 3.8 数码照相	208

第四章 设计性实验	220
§ 4.1 半导体温度计的设计	220
§ 4.2 AD/DA 转换	220
§ 4.3 压力传感器	221
§ 4.4 可控硅(SCR)	222
§ 4.5 恒温控制技术	225
§ 4.6 用分光计测玻璃片的折射率	226
§ 4.7 投影仪的设计与组装	226
§ 4.8 CD 唱片道间距的测定	229
附录	231
主要参考文献	232

绪 论

一、物理实验课的地位和作用

物理学从本质上讲是一门实验科学。物理规律的发现和物理理论的建立,都必须以严格的物理实验为基础,并受到物理实验的检验。离开物理实验,就没有物理学研究,也就没有物理学本身。因此,物理实验既是物理学理论的源泉,又是检验物理理论真理性的最终标准。当然,一些物理实验问题的提出,以及实验的设计、分析和概括也必须应用已有的理论。纵观物理学的发展史表明:物理学的发展是在实验和理论两方面相互推动、相互促进和密切配合下进行的。

物理实验是物理教学十分重要和必不可少的教学环节,我们必须正确处理好理论课和实验课的关系,要求学生既动脑,又动手,切不可偏废于某一方。

物理实验课作为高等院校一门重要的基础课程,是学生进入大学后受到系统的、严格的实验技能训练的开始,又是后续课程实验的基础。

物理实验课教学的目的和任务是:

首先,在具有一定的物理基础理论知识的基础上,对学生进行实验方法和实验操作技能的训练。通过实验使学生做到:确切理解实验原理,掌握一些物理量的测量方法;熟悉常用仪器的基本原理、性能、使用方法;能正确记录、处理实验数据;分析和判断实验结果;写出比较完备的实验报告并具有初步的实验设计能力。

其次,培养和提高学生观察、分析实验现象的能力,以及理论联系实际的独立工作能力。通过实验,加深和扩充对物理学的某些概念和理论的理解,增强学生将理论应用于实践的信心,调动学生学习的积极性,激发学生的创新能力。

最后,培养学生严谨的科学态度,实事求是的工作作风和遵守纪律、爱护国家财产的优良品德。

总之,物理实验课的地位和作用物理理论课所不能代替的。通过物理课的学习,使学生不仅具有较扎实的物理基础理论知识,而且具有一定的科学实验能力和科学的思维方法,为今后从事科学研究打下良好的基础。

二、大学物理实验课的基本要求

通过物理实验的学习,学生应达到以下三方面的要求:

首先,养成良好的科学实验习惯。通过物理实验课的学习,使学生深刻理解科学实验的重要性,明确物理实验课的地位、作用和任务;有意识地培养良好的科学实验素养,如实事求是、严肃认真、理论联系实际的科学作风;养成遵守实验室各项规章制度、团结协作、爱护公共财物、维护实验室整洁等优良品德。

其次,学习和掌握物理实验的基础知识。通过对物理实验现象的观察、分析和对物理量的测量以及数据处理、分析,学习和掌握物理实验的基础知识,如误差理论基础知识,包括:测量误差的基本概念,直接测量结果的误差评估,间接测量误差评估,有效数字运算,处理实验数据的一些重要方法,如列表法、作图法、逐差法、最小二乘法等;学习如何运用物理实验原理和方法去研究具体物理问题,加深对物理理论的理解。

最后,培养和提高学生的科学实验能力,应包括:

(1) 培养和提高学生的自学能力。通过仔细阅读实验教材,做好实验前的准备,对于实验的原理,可能出现的问题,如何圆满地完成实验等,都能够查阅有关资料而得到初步解决。

(2) 培养和提高学生的动手能力。在实验中,能正确地选择仪器设备和实验器材并合理地布局联接,能正确地使用仪器进行测量,得到比较准确的实验数据。能够排除实验中的简单故障,掌握基本的物理实验技能。

(3) 培养和提高学生分析问题的能力。通过对实验的观察、测试、分析和判断,用理论联系实际的方法去指导实验。

(4) 培养和提高学生的设计能力,根据研究对象或实验课题要求,通过查阅资料,根据某个理论,制定实验方案,确定选择的仪器和试验程序。

(5) 培养和提高学生使用计算机辅助设计实验和数据处理的能力。

三、大学物理实验课的程序

大学物理实验课分为三个程序。

1. 实验前的预习

由于每个实验都有理解原理、熟悉仪器设备、掌握实验方法及测量数据等比较繁重的任务,而实验课的课内时间有限,因此,决不允许不预习就做实验。为了提高教学效果,对实验做到胸有成竹,有的放矢,要求学生必须做好实验前的预习。预习的要求:

(1) 预习实验教材。实验前仔细阅读实验教材,掌握实验的原理,熟悉实验方法,尤其应注意实验中关键之点和所需注意事项,解答思考题,了解仪器设备使用说明。

(2) 写好预习报告。预习报告要求写明实验名称、实验目的、实验原理、实

验内容和步骤以及数据记录表等。每次实验前教师应检查实验预习报告,未达到要求者,将不允许做实验。

2. 进行实验

实验是整个教学的中心环节。实验前要认真听老师讲解重点和难点,熟悉各种仪器的使用方法和操作规程,记录实验条件(如日期、同组姓名、温度、湿度、气压等),根据实验内容和方法,合理布局,正确连接仪器设备。对于电磁学实验,必须经教师检查电路的连接正确无误后,方能接通电源进行实验。然后按实验内容及步骤做实验。实验中应仔细观察实验现象,如实记录实验数据,决不允许涂改或抄袭他人数据。若遇到疑难问题或出现故障自己不能解决时,应立即报告教师。实验结束时,应将实验数据交教师审阅签字后,并整理好仪器设备,经教师同意后,方可离开实验室。

3. 实验报告

实验报告是对实验结果全面的书面总结和分析,是培养学生科学表达能力的重要环节,是反映学生实验成功与否的依据。实验报告内容应包括:

- (1) 实验名称、时间、院(系)、专业、班、姓名、同组实验者姓名、指导教师等。
- (2) 实验目的。
- (3) 实验仪器。
- (4) 实验原理。包括主要公式,叙述要清楚,简明扼要。
- (5) 实验步骤。概括地写出实验进行的主要过程。
- (6) 实验数据处理。包括实验数据表格、作图、计算及误差分析。
- (7) 对实验的分析。包括对实验的方法、结果的分析和体会及意见等。

实验报告一律采用学校统一的实验报告纸书写。要求字迹清楚,书写工整,文字通顺,语言简洁,条理清晰,图表规范。

第一章 误差理论

§ 1.1 测量与误差

测量误差的基本概念

1. 直接测量与间接测量

用测量工具直接得出观测对象的大小,叫做直接测量,如用尺测长度。观测对象的大小由直接测量的结果通过一定的函数关系计算得出,叫做间接测量,如直接测得距离和时间求出速度。

2. 真值、观测值、误差和误差公理

观测对象的客观大小叫做真值。由直接或间接测量得出的大小叫做观测值。设以 $\bar{a}$ 表真值, a 表观测值,则差值

$$x = a - \bar{a} \quad (1.1.1)$$

叫做观测值的误差。这是误差的普遍定义。对于同一(包括测量人员、仪器、环境等的同一)条件下重复进行多次观测(称一组观测)时,设第 i 次观测值为 a_i , 则对应的误差为

$$x_i = a_i - \bar{a} (i = 1, 2, \dots, n) \quad (1.1.2)$$

由于仪器和人的感官的分辨能力总是有限的,环境又不能完全控制,因此,“任何测量过程的始终和一切测量结果都存在着误差”,这就是误差公理。

综上所述,观测对象的真值是无法测知的,只能得到它的近似值。但在某些情况下,为了对误差做出近似估计,可以把①国际公认值、②标准仪器测得的观测值、③理论值、④最佳近似值等作为真值,而用式(1.1.1)或(1.1.2)来估计误差。

3. 绝对误差和相对误差

定义式(1.1.1)的绝对值叫做绝对误差。相对误差,又叫百分误差,它是绝对误差对真值(或其代替值)之比,通常以百分比表示。在评价测量结果时,相对误差很能说明问题。如两长度测量结果为 10.0 cm 和 100.0 cm,绝对误差都是 ± 0.1 cm,前者的相对误差为 $\pm 0.1/10.0 = \pm 1\%$;而后的相对误差为 $\pm 0.1/100.0 = \pm 0.1\%$,显然后一测量结果更好。

4. 误差分类

误差按其产生的原因不同可分为以下三种：

(1) 系统误差。在相同条件下的重复测量中,误差的大小和符号保持一定,或按一定的规律变化。它由仪器不准,实验理论有缺陷,个人生理或心理特点等所引起。系统误差可以设法消除。办法是查找原因,事前防止,事后进行修正。

(2) 偶然误差(随机误差)。由人力难以控制的偶然因素所引起的,如测量环境的起伏变化,仪器性能的波动,人的感觉能力的波动等。偶然误差的符号、大小变化无常,但遵从一定的统计规律。偶然误差不能消除,误差理论的研究对象就是偶然误差。

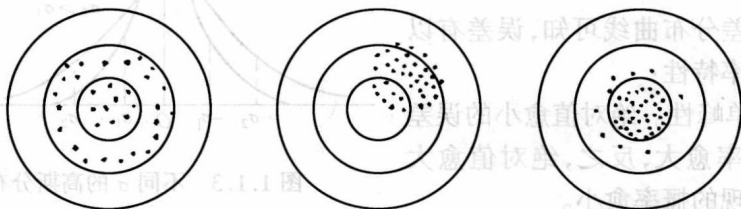
(3) 过失误差:这种误差也可以不列为误差之分类,因为它是一种错误,是工作粗枝大叶、不负责任造成的。这种错误应该杜绝。

5. 测量的准确度、精密度和精确度

准确度,表示测量中系统误差大小的程度。准确度愈高,说明多次测量值的分布中心愈接近真值。像打靶的弹着点重心在靶心(图 1.1.1a)。

精密度,表示测量中偶然误差大小的程度。精密度愈高,多次测量值的分布愈集中,即离散度愈小。像打靶的弹着点密集在一起(图 1.1.1b)。

精确度,是准确度与精密度的综合指标。精确度愈高,其系统误差和偶然误差均愈小。像打靶的弹着点既密集在一起,重心又在靶心(图 1.1.1c)。



a 准确度好,精密度差

b 精密度好,准确度差

c 精确度好

图 1.1.1 弹着点的分布情况

6. 偶然误差遵从的规律和它的概率特性

根据大量实验数据的统计分析,在同一条件下进行多次观测时,偶然误差遵从一定的概率分布规律,最常见的是高斯分布(正态分布)和 t 分布等(请参看有关误差理论的书籍)。高斯分布曲线如图 1.1.2 所示。横轴 x 为测量的偶然误差,纵轴 $f(x)$ 表示误差出现的概率密度。曲线下的面元 $f(x)dx$,即阴影部分,是误差为 x 到 $x+dx$ 出现的概率。函数 $f(x)$ 是德国人高斯(1777—1855)推导出来的:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} \quad (1.1.3)$$

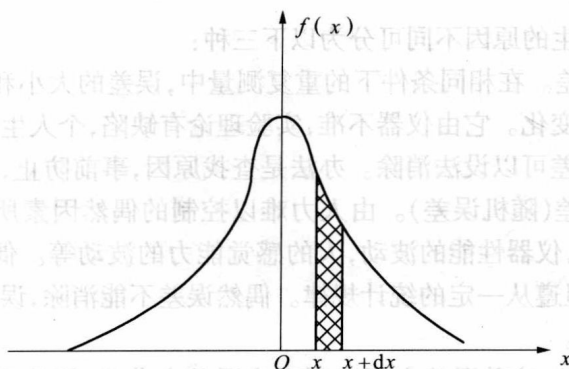


图 1.1.2 高斯分布曲线

式中, σ 叫标准误差, e 是自然对数的底。若令精密密度指数 $h = 1/(\sqrt{2} \cdot \sigma)$, 则

$$f(x) = \frac{h}{\sqrt{\pi}} e^{-h^2 x^2} \quad (1.1.4)$$

当 $x=0$ 时, $f(0) = h/\sqrt{\pi} = 1/(\sqrt{2\pi}\sigma)$ 。

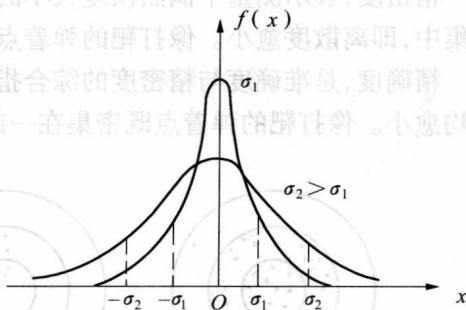
可见 σ 愈小, $f(0)$ 就愈大, 误差分布曲线愈陡, 数据愈集中 (亦即精密密度指数 h 愈大, 测量精密密度愈高)。如图 1.1.3 所示。

从误差分布曲线可知, 误差有以下几个概率特性:

(1) 单峰性。绝对值愈小的误差出现的概率愈大, 反之, 绝对值愈大的误差出现的概率愈小。

(2) 对称性。绝对值相等的误差出现的概率相等。

(3) 有界性。绝对值很大的误差出现的概率近乎等于零, 即很少出现。也就是在一定的条件下, 误差不会超过某一限度 (界限)。

图 1.1.3 不同 σ 的高斯分布

§ 1.2 算术平均值与误差的估算

一、观测值的算术平均值和偏差

设把一组等精密密度 (观测人员、仪器、环境等观测条件相同的观测叫等精密密度观测) 的观测值 a_i ($i=1, 2, \dots, n$) 的算术平均值记作 $\bar{a}$, 则

$$\bar{a} = \frac{a_1 + a_2 + \cdots + a_n}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n a_i}{n} \quad (1.2.1)$$

可以证明,算术平均值是没有系统误差条件下观测对象真值的最佳近似值,即当 $n \rightarrow \infty$ 时,算术平均值就是真值:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sum_{i=1}^n a_i}{n} = \bar{a} \quad (1.2.2)$$

偏差,习惯上用 U 表示,一组观测值 $a_i (i=1, 2, \dots, n)$ 的各偏差表示为

$$U_i = a_i - \bar{a} \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (1.2.3)$$

不难证明各偏差之和为零,即

$$\sum_{i=1}^n U_i = 0 \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (1.2.4)$$

偏差 U 与误差 x 之间有以下关系:

$$\sum_{i=1}^n U_i^2 = \frac{n-1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^2 \quad (\text{当 } n \text{ 足够大时}) \quad (1.2.5)$$

式(1.2.5)的实际意义在于将不可计算的误差式(1.1.2)与可以实际计算的偏差式(1.2.3)联系起来,使我们能通过偏差的计算去估计误差。

二、标准误差和标准偏差

在 1.1 中曾经见过标准误差 σ , 它的定义是误差平方的平均值的平方根

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (a_i - \bar{a})^2}{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n x_i^2}{n}} \quad (1.2.6)$$

它是高斯误差定律中的一个重要参数,决定着误差分布的平坦或陡峭(见图 1.1.3),是衡量精密度的一个指标。由于观测对象的真值无法测知,式(1.2.6)无法计算。根据式(1.2.5)误差与偏差的关系,不难得到标准偏差

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n U_i^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (a_i - \bar{a})^2}{n-1}} \quad (1.2.7)$$

标准误差 σ 与标准偏差 S 的区别在于前者要求 $n \rightarrow \infty$, 后者则要求 n 足够大就行。好处是标准偏差可以计算,这在误差估计中经常用到。

三、直接测量误差的估计

1. 误差限、置信度和置信区间

前面已说过,测量误差总是存在,对观测对象的真值是无法测知的,只能得

到真值的最佳近似值——观测值的算术平均值。所以误差只能用标准误差 σ (实际是标准偏差 S) 来进行估计。这样得到的误差范围,叫误差限。由此可以判断:在同一条件下进行一组观测时,各测量值的误差,在一定的可靠程度(置信度)下,会在这个误差限内。这个误差限组成的区间,就叫置信区间。

例如,用米尺测得一物体长度结果是 $10.5 \pm 0.1(\text{cm})$, 如果这个结果的置信度为 60%, 那么各测量值的误差就有 60% 的可能(概率)落在区间 $[-0.1, 0.1]\text{cm}$ 之中, 也就是各测量值在 $[10.5 - 0.1(\text{cm}), 10.5 + 0.1(\text{cm})]$ 之间的概率是 60%。这就是测量值及其误差与误差限、置信度和置信区间的关系。

2. 直接测量误差的估计和测量结果的表示

前面已讲过, 误差只能估计, 且只能用标准偏差 S 来估计。实质就是确定一个误差限。

误差限的确定方法有多种。前面讲的用标准偏差 S 来估计是一种国际上常用的方法。本书将以此为主。如果条件不具备的也可用平均误差

$$\Delta a = \frac{\sum_{i=1}^n |a_i - \bar{a}|}{n} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (1.2.8)$$

来表示。式中 a_i 为各观测值, $\bar{a}$ 为各观测值的算术平均值, n 为观测次数。

假设在同一条件下进行相同观测次数 n 的多组观测, 各组观测值的算术平均值一般不会相同。同前一样, 可以用这些平均值的标准偏差 S_a 来评价各平均值的精密度。统计学上有个定律指出: 各算术平均值的标准偏差 S_a 与一组观测各观测值的标准偏差 S 之间有以下关系:

$$S_a = \frac{S}{\sqrt{n}} \quad (n \text{ 足够大}) \quad (1.2.9)$$

将式(1.2.7)代入上式得

$$S_a = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (a_i - \bar{a})^2}{n(n-1)}} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (1.2.10)$$

比较式(1.2.7)和(1.2.10)可知, 增加测量次数 n , 可使测量误差减少 $\sqrt{n}$ 倍。因为一算术平均值的标准偏差 S_a 比一观测值的标准偏差 S 减少了 $\sqrt{n}$ 倍。

综上所述, 在没有系统误差和过失误差, 测量条件相同的情况下, 对某物理量 A 进行 n 次重复测量, 所得算术平均值 $\bar{a}$ 是其真值的最佳近似值; 用具有一定置信度的方法确定的误差限 λS_a 来表明其精密度, 就能正确表示出该物理量 A 的最终结果