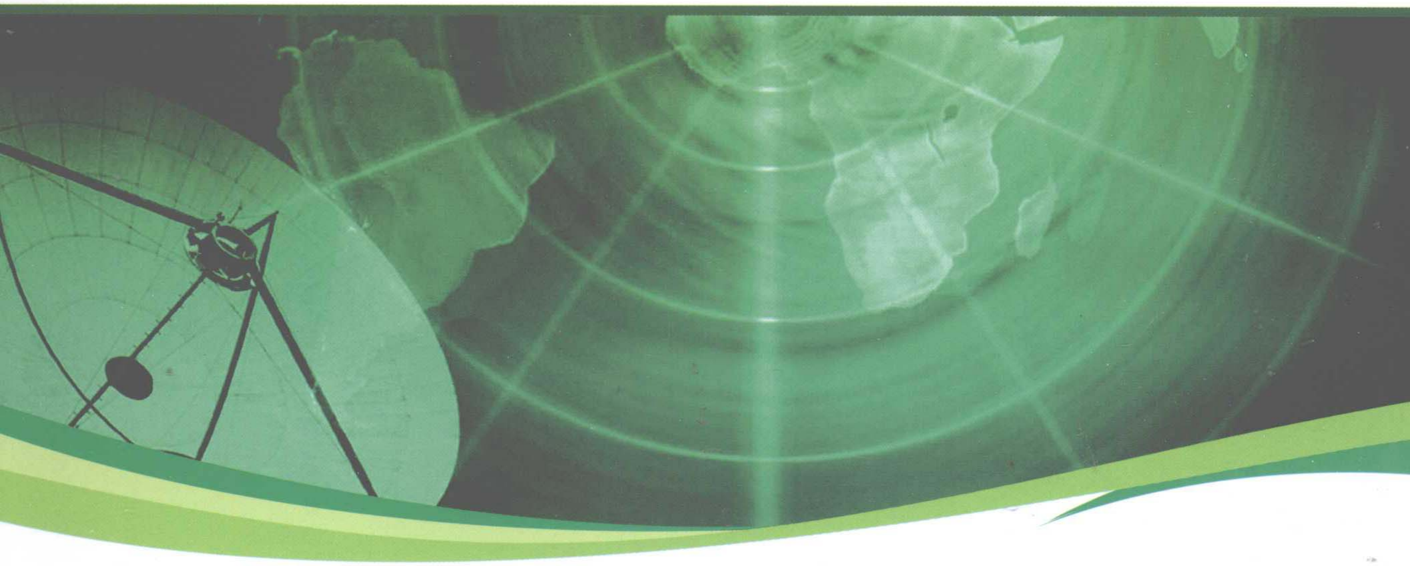
河南省重点图书出版规划教材

近代物理实验

JINDAI WULI SHIYAN

总主编　李玉晓



本册主编◎侯晓强　王　军

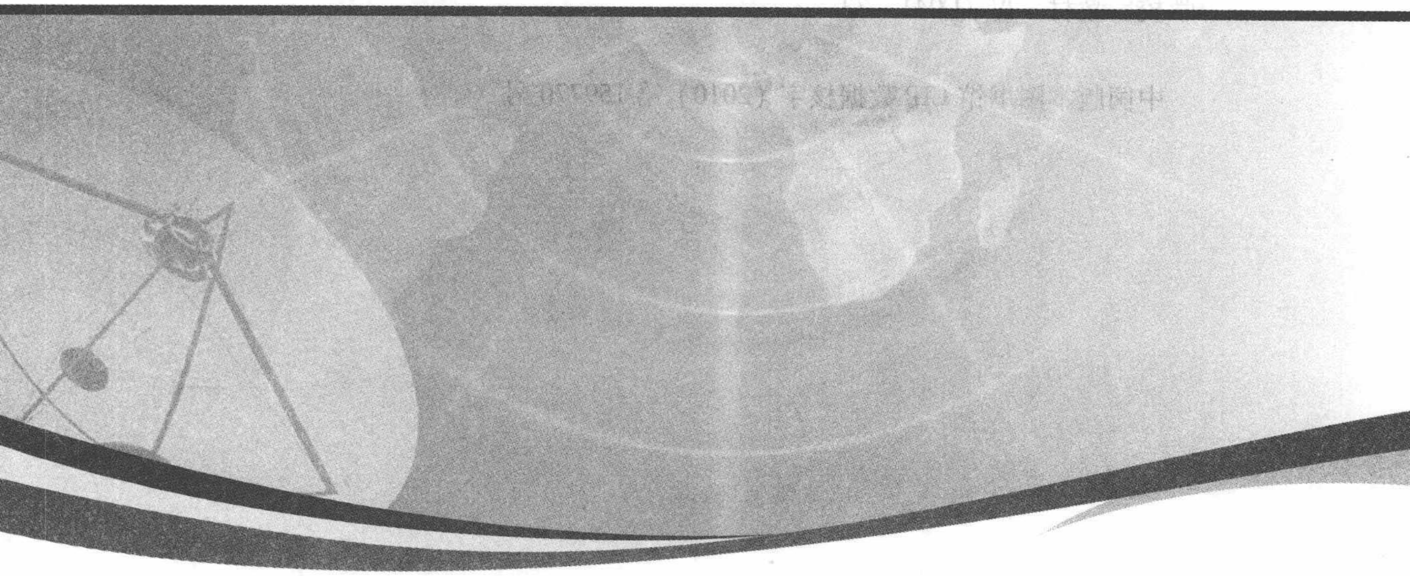
郑州大学出版社

河南省重点图书出版规划教材

近代物理实验

JINDAI WULI SHIYAN

总主编 李玉晓



本册主编◎侯晓强 王 军

郑州大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

近代物理实验/侯晓强，王军主编．—郑州：郑州大学出版社，2010.9

ISBN 978－7－5645－0062－7

Ⅰ.①近…　Ⅱ.①侯…②王…　Ⅲ.①物理学－实验－高等学校－教材　Ⅳ.①041－33

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2010）第 159770 号

郑州大学出版社出版发行
郑州市大学路 40 号　　邮政编码:450052
出版人:王　锋　　发行部电话:0371－66966070
全国新华书店经销
河南省公安厅文印中心印制
开本:787 mm×1 092 mm　1/16
印张:21.25
字数:506 千字
版次:2010 年 9 月第 1 版　　印次:2010 年 9 月第 1 次印刷

书号:ISBN 978－7－5645－0062－7　　定价:32.00 元

近代物理实验

编委名单

总主编 李玉晓

主　编 侯晓强　王　军

副主编 薛新莲　郭　娟　张腊花

编　委 张逸民　侯秀梅　莫　炯
胡振纲　朱志立　刘一飞

近代 物理 实验

内容提要

近代物理实验是物理及相关专业的一门重要基础课程，其主要目标是培养学生的实验思维方式和科技创新能力。本教材是参照教育部高等院校物理学与天文学教学指导委员会实验物理指导组1999《高等理科物理学专业（四年制）近代物理实验教学基本要求》确定的实验内容编写的。内容涉及误差理论与数据分析、原子与分子物理实验、核物理实验、磁共振技术、真空与薄膜技术、材料分析与测量、低温物性测量、激光和全息技术与光学测量、微波技术、声学实验等领域，共40个实验项目。详细阐述了每个实验的背景知识、实验原理、实验仪器、实验内容和注意事项。

本书可作为高等院校物理类专业本科生和研究生的近代物理实验教材或教学参考书，也可供其他专业从事相关工作的科研人员参考。

前言

近代物理实验是为物理类专业高年级学生开设的一门综合性较强的基础实验课程。该课程以一些著名经典实验和在近代物理实验技术中有广泛应用的典型实验为教学内容。它不仅能使学生掌握如何用实验方法观察物理现象,研究物理规律,更能够让学生了解近代实验技术在许多科学研究领域与工程实践中的广泛应用;它有助于开阔学生的视野,激发他们理论联系实际、刻苦好学的钻研精神。教学实践表明,学生对该课程的学习有浓厚兴趣,是培养他们实践动手能力的重要环节。我们在吸取兄弟院校经验的基础上,对实验讲义进行了多次修订补充,力求使本教材能够适应现代教学的需要,适应新世纪高等教育发展趋势。本教材是参照教育部高等院校物理学与天文学教学指导委员会实验物理指导组1999《高等理科物理学专业(四年制)近代物理实验教学基本要求》确定的实验内容编写的,内容涉及原子物理、核物理、磁共振技术、真空与薄膜技术、材料分析与测量、低温物性测量、激光、全息技术与光学测量、微波技术、声学实验等领域10个单元,共40个实验项目。详细阐述了每个实验的背景知识、实验目的、实验原理、实验仪器、实验内容和注意事项。在选题上保证基础物理内容不削弱的前提下,增加了应用技术方面的内容,以培养学生应用物理知识,解决实际问题的创新思维和能力。

实验教学工作是一项群体性工作,从实验室的建设,教材的编写以及实验内容的改进、改革都凝聚着众多同志心血。

在教材的编写过程中，校、院领导给予了大力支持，物理实验中心的大多数教师和技术人员参与了教材的编写工作。在此，我们谨对参与近代物理实验教学工作的同志表示衷心的感谢。

本书具体编写分工为：张逸民教授编写了第1章误差理论与数据分析；侯晓强教授编写了第3章实验3.0、3.1、3.2、3.3和第2章实验2.7；侯秀梅副教授编写了第6章实验6.3、6.4、6.5；莫炯副教授编写了第4章实验4.0、4.1、4.2、4.3、4.4；张腊花编写了第2章实验2.0、2.3、2.4、2.5、2.6和第8章实验8.8；王军编写了第2章实验2.1、2.2和第4章实验4.0、4.1、4.2以及第6章实验6.0、6.1、6.2；郭娟编写了第7章实验7.0、7.1、7.2、7.3、7.4；胡振纲编写了第8章实验8.0、8.1、8.2、8.3、8.4和第5章实验5.3；朱志立编写了第8章实验8.5、8.6、8.7和第6章实验6.5、6.7以及第10章10.3；薛新莲编写了第9章实验9.0、9.1、9.2和第10章实验10.0、10.1、10.2以及附表Ⅰ、Ⅱ；刘一飞编写了第3章实验3.4、3.5。

由于我们的学术水平有限，一定存在不少的缺点和错误，敬请读者批评指正。

编者

2010年5月

近代**物理**实验

目录

1 误差理论与数据分析

1.1 物理实验中的测量误差

1.1.1 测量

物理实验需要对各种物理量进行测量。测量的定义是:以确定量值为目的的一组操作。测量是一个过程,是将被测量与已知的标准量(计量器具的示值)相比较的过程,其目的是确定被测量的值或获取测量结果。任何一个测量过程都包含五个要素:测量设备、测量方法、测量环境、测量人员和被测对象。

1.1.1.1 等精度测量和不等精度测量

根据测量条件的不同,可将测量分为等精度测量和不等精度测量。等精度测量是指在参与测量的上述五个要素,即测量仪器、测量人员、测量方法、测量环境和被测量对象均不发生改变的条件下的多次重复测量。等精度测量又称为重复性测量。不等精度测量是指参与测量的五个要素除被测对象不能改变外,其他四个因素全部或任何一个因素发生改变所进行的测量。不等精度测量也称为复现性测量。

1.1.1.2 直接测量和间接测量

根据测量值获得方法的不同,可将测量分为直接测量和间接测量。被测量直接从仪器或量具上读出,无需对被测的量与其他量进行函数关系的辅助计算,这样的测量称为直接测量。依据直接测量的量与被测量之间的已知函数关系,通过计算得到被测量量值,这样的测量称为间接测量。

任何一种测量,测量的结果都存在误差。

1.1.2 测量误差的定义及表示法

测量误差是指测量值与被测量的真值之间的差异,其定义为:

$$测量误差=测量值-真值$$

1.1.2.1 **真值**

真值是指被测量在特定的条件下的客观实际值。测量的目的在于确定被测量的真值,由于参与测量的所有要素都不能做到严格完善,使得测量存在误差,测量结果只能是真值的近似值。一般情况下真值是不可知的,只有在某些特殊情况下,能知道被测量的真值。真值有以下几种:

(1)理论真值 如平面三角形三内角之和恒为 180°;理论公式表达值或理论设计值等。

(2)计量单位制中的约定真值 国际单位制所定义的七个基本单位,根据国际计量大会的共同约定,凡是满足上述定义条件而复现出的有关量值都是真值。

(3)约定标准器真值 凡高一级标准器的误差是低一级或变通测量仪器误差的$\frac{1}{3}\sim\frac{1}{20}$时,则可认为前者是后者的约定真值。如经国家级鉴定合格的标准器称为国家标准器,它在同一计量单位中精确度最高,从而作为全国该计量单位的最高依据。国际铂铱合金千克原器的质量将作为国际千克质量的真值。

(4)最佳估计值 通常将一被测量在重复条件或复现条件下的多次测量结果的平均值作为最佳估计值,并作为约定真值。如常数委员会(CODATA)所公布的物理常量的值。

在科学实验中,真值就是指在无系统误差的情况下,观测次数无限多时所求得的平均值。但是,实际测量次数总是有限的,故可用有限次测量所求得的平均值作为近似真值。

1.1.2.2 **测量误差的表示方法**

(1)绝对误差 测量值与被测量真值之差称为绝对误差,即

$$绝对误差=测量结果-真值$$

绝对误差是测量值偏离真值大小的反映。

(2)相对误差 绝对误差与真值的比值所表示的误差大小称为相对误差,即

$$相对误差=\frac{绝对误差}{真值}=\frac{绝对误差}{约定真值}$$

为了计算方便,在有些测量领域规定使用如下相对误差计算公式:

$$相对误差\approx\frac{绝对误差}{测量值}$$

(3)引用误差 引用误差定义为测量仪器的误差除以仪器的特定值,即

$$引用误差=\frac{示值误差}{特定值}$$

对于具有连续刻度和多挡量程的测量仪器,它们的误差要用引用误差表示。定义中

的示值误差是用测量仪器各示值点上的绝对误差来表示，通常取绝对值最大的。

特定值可以是测量仪器的量程或标称范围的上限。量程是指测量仪器标称范围上限值与下限值之差的模。

$$\text{引用误差}=\frac{\text{绝对误差}}{\text{特定值}}$$

国家标准和国家计量技术规范将某些专业的仪器仪表，按引用误差的大小分为若干准确度等级。例如，电压表和电流表就是根据引用误差的大小，分为 0.1、0.2、0.5、1.0、1.5、2.5、5.0 七个等级。

(4)分贝误差　在无线电、声学等计量中常用分贝误差来表示相对误差。两个同种物理量之比取对数，再乘以 20，称为分贝 A，其单位用 dB 表示。

设两个同种物理量之比为 a

$$a=\frac{p_2}{p_1} \tag{1.1}$$

按分贝的定义有

$$A=20\cdot\lg a=20\times\frac{\ln a}{2.303}=8.69\cdot\ln a \tag{1.2}$$

如果比值 a 产生了一个误差 δa，那么将引起 A 产生一个误差 δA，δA 称为分贝误差。则

$$A+\delta A=20\cdot\lg(a+\delta a) \tag{1.3}$$

式(1.3)减去式(1.2)，得

$$\delta A=20\cdot\lg\left(1+\frac{\delta a}{a}\right)=8.69\cdot\ln\left(1+\frac{\delta a}{a}\right) \tag{1.4}$$

由于

$$\lim_{\frac{\delta a}{a}\ll 1}\ln\left(1+\frac{\delta a}{a}\right)\approx\frac{\delta a}{a}$$

则

$$\delta A\approx 8.69\,\frac{\delta a}{a} \tag{1.5}$$

1.1.3 误差的分类

1.1.3.1 系统误差

系统误差定义为在重复性条件下，对同一被测量进行无限多次测量所得结果的平均值与被测量的真值之差。系统误差的典型特征是具有确定的规律性，不能用增加测量次数的方法使它减小或消除。系统误差不具有抵偿性。系统误差产生的原因可归结为以

下几个方面。

(1)测量装置方面的原因　由于使用的仪器或量具在结构上不完善、或没有按照操作规程使用而引起的误差。例如仪器的标尺刻度误差,天平的不等臂性引起的误差。

(2)环境方面的原因　由于测量时的环境影响量(如温度、湿度、气压、电磁场等)偏离规定值时而产生的误差。

(3)测量方法的原因　测量方法本身的理论根据不完善或采用了近似公式引起的误差。

(4)观察者自身的因素　由于观测者的生理或心理上的特点和固有习惯所造成的误差。例如,观测者对刻度尺进行估读时,习惯地偏向某一方向(始终偏大或偏小)记录信息或计时的滞后等所造成的误差。

在实验中发现和消除系统误差是很重要的,因为它常常是影响实验结果准确程度的主要因素。实验中发现系统误差是否存在常用的方法有对比检验法,将实验结果跟标准值或理论值相比较,或者是跟准确度较高的仪器设备的测量值相比较,或者是跟采用不同的实验方法测得的结果相比较,看结果是否一致,若不一致,可能存在系统误差;也可以通过对实验数据分析,如果发现实验误差的大小有规律的变化,则可能有系统误差;还可以直接分析实验原理、实验方法和实验条件是否合理,是否完备。如果实验方案本身就存在着不完备性,例如计算公式是近似的,测量方法受到某种副效应或某种干扰的影响,则这个实验必然存在着系统误差。

由于系统误差产生的原因种类繁多,所以对系统误差的处理还没有一种普遍适用的方法,只能针对具体的实验,具体的测量,采取相应的测试技术措施来减小或消除它。这就要求实验人员在实验之前,要对实验中可能产生系统误差的各个环节做仔细的分析,并采取相应的措施将系统误差从产生根源上加以消除或减小。若系统误差来自仪器不准确或使用不当,则应把仪器校准并按规定的使用条件去使用;若理论公式只是近似的,则应在计算时加以修正;若测量的环境条件达不到要求,则应设法改善实验的环境条件;如果测量方法上存在着某种因素会带来系统误差,则应改变测量方法以消除其影响。实验中限制和消除系统误差的常用方法有替代测量法、异号测量法、交换测量法,对称观测法、半周期偶次测量法,实时反馈修正法等。这些方法的使用,将通过具体的实验进行学习和掌握。

1.1.3.2　随机误差

随机误差定义为:测量结果与在重复条件下对同一被测量进行无限多次测量所得结果的平均值之差。随机误差等于误差减去系统误差。随机误差是由实验中多种因素微小变化引起的。例如,实验环境(温度、气压等)的微小波动,测量人员在瞄准、估计读数上的随机性等等。

随机误差的主要特征是具有随机性。在重复性测量条件下对同一被测量多次重复测量,单次测量的随机误差时大时小,符号时正时负,没有确定的规律。当重复测量次数足够大时,随机误差服从统计规律。

随机误差处理方法的理论依据是概率论与数理统计。

1.1.3.3 粗大误差

粗大误差是指明显超出规定条件下预期的误差，简称粗差。粗大误差的主要特征是明显歪曲测量结果。其原因可归结为测量条件的突变和人为因素所致。如错误操作、错误读数、错误记录等导致的测量误差均属粗大误差。粗大误差属非正常测量误差，对含有粗大误差的测量结果应予以剔除。

1.2 概率理论与数理统计基础

1.2.1 随机事件和随机变量

随机事件是在一定条件下可能出现也可能不出现的事件。例如：某细丝直径测量的结果在0.91 mm 和0.92 mm 之间；抛掷硬币实验中出现硬币正面朝上的事件等均是随机事件。随机事件的特点是事先无法预言它所出现的结果，其结果呈现出一种偶然性。

如果某一个量（例如测量结果）在一定条件下取某一值或在某一范围内取值是一个随机事件，则这样的量叫做随机变量。随机变量不同于其他变量的特点是：它是以一定的概率，在一定的区间上取值或取某一个固定值。随机变量根据其取值特征可以分为连续型随机变量和离散型随机变量两种。若随机变量 X 可在坐标轴上某一区间内取任一数值，即取值布满区间或整个实数轴，则称 X 为连续型随机变量。若随机变量 X 的取值可离散地排列为 $x_1,x_2,\cdots$ 而且 X 以各种确定的概率取这些不同的值，即只取有限个或可数个实数值，则称 X 为离散型随机变量。

1.2.2 概率和分布函数

1.2.2.1 事件的概率

如果在一定的条件下，连续进行 N 次试验，事件 A 发生了 N_A 次，N_A 称为事件的频数，比值 N_A/N 称为事件 A 发生的频率。当 N 极大时，频率 N_A/N 稳定地趋于某一个常数 p，此常数是 $N\to\infty$ 时，频率的极限值，称为事件 A 的概率，记为 $P(A)$，即

$$P(A)=\lim_{N\to\infty}\frac{N_A}{N}=p \tag{1.6}$$

概率运算有如下定理：

（1）概率加法定理　若事件 A 和事件 B 不能同时出现，称 A,B 为互斥事件。互斥事件 $A_1,A_2,\cdots,A_n$ 中任一事件出现的概率，为各个事件概率的总和。

$$P(A)=P(A_1)+P(A_2)+\cdots+P(A_n)=\sum_{i=1}^{n}P(A_i) \tag{1.7}$$

（2）概率乘法定理　若事件 A 的出现并不影响事件 B 的出现，则称事件 A 与事件 B 是相互独立的事件。事件 $A_1,A_2,\cdots,A_n$ 为相互独立事件，则各独立事件同时出现的概率，等于各个独立事件概率的乘积。即

$$P(A_1A_2\cdots A_n) = P(A_1)P(A_2)\cdots P(A_n) = \prod_{i=1}^{n} P(A_i) \tag{1.8}$$

1.2.2.2 分布函数

对于随机变量,不仅要了解其可能取的全部值,还必须了解各种可能取值的概率,即随机变量的概率分布。

设 X 是一个随机变量,x 是任意实数,那么变量$[X<x]$的概率是一个 x 的函数。令

$$F(x) = P[X \leqslant x] \tag{1.9}$$

显然有

$$F(-\infty) = 0 \qquad F(+\infty) = 1$$

我们称 $F(x)$为随机变量 X 的分布函数。

如果已知 X 的分布函数,那么就知道 X 在任一区间$[a \leqslant x \leqslant b]$的概率。也就是说分布函数完整地描述了随机变量 X 的统计特性。

(1)离散型随机变量的分布函数　设 x_1、x_2、$\cdots$、x_n是离散型随机变量 X 所取的值。p_1、p_2、$\cdots$、p_n分别为 X 取上述值的概率,即

$$P(x_i) = p_i \qquad (i = 1, 2, \cdots, n)$$

概率 p_i 应满足条件

$$\sum_{i=1}^{n} p_i = 1$$

则离散型随机变量的分布函数为

$$F(x) = \sum_{x_i < x} P(x_i) = \sum_{x_i < x} P_i \tag{1.10}$$

(2)连续型随机变量的分布函数　设连续型随机变量 X 取值于区间(a,b),则 X 的分布函数 $F(x)$对于任意两实数 x_1、x_2($x_1 < x_2$)有

$$F(x_2) - F(x_1) = P(x_1 < x < x_2) \geqslant 0$$

即 $F(x)$是单调增函数,并且假定 $F(x)$在$(-\infty < x < +\infty)$间是连续的,是可微分的,且导数 $F'(x)$在此区间连续。为了描述连续性随机变量概率分布规律,需要引入概率分布密度函数$f(x)$。

设变量落在 x 至 $x+\Delta x$ 区间内的概率为

$$P(x < X \leqslant x + \Delta x) = F(x + \Delta x) - F(x)$$

则

$$\lim_{\Delta x \to 0} \frac{F(x + \Delta x) - F(x)}{\Delta x} = F'(x) = f(x) \tag{1.11}$$

$f(x)$为概率分布密度函数。$f(x)$定义为概率分布函数$F(x)$的导数。则分布函数为

$$F(x) = \int_{-\infty}^{x} f(x)\,\mathrm{d}x \tag{1.12}$$

$f(x)$应满足归一化条件

$$\int_{-\infty}^{+\infty} f(x)\,\mathrm{d}x = 1 \tag{1.13}$$

若已知概率分布密度$f(x)$，则随机变量X落在某一区间(x_1, x_2)内的概率为

$$P(x_1 < X \leqslant x_2) = \int_{x_1}^{x_2} f(x)\,\mathrm{d}x \tag{1.14}$$

上述关于分布函数和概率分布密度函数的概念都可以推广到多个随机变量的情形。如果X和Y是两个互相独立的随机变量，那么根据概率论，它们的联合概率密度函数等于各自的概率密度函数的乘积，即

$$f(x,y) = f(x)f(y)$$

1.2.3 随机变量的数字特征

随机变量有不同形式的分布，为了研究方便，常用一些共同定义的数字特征量来表征他们，最重要的特征量是随机变量的数学期望和方差。

1.2.3.1 随机变量的数学期望

随机变量的数学期望定义为：对该随机变量进行无限多次测量结果的平均值。数学期望实际上就是我们通过测量想要得到的测量结果。

随机变量X的数学期望通常用$E(X)$或μ表示：

对于离散型随机变量

$$\mu = \sum_{i=1}^{\infty} x_i p_i \tag{1.15}$$

对于连续型随机变量

$$\mu = E(X) = \int_{-\infty}^{+\infty} x f(x)\,\mathrm{d}x \tag{1.16}$$

1.2.3.2 随机变量的方差

随机变量的方差定义为：随机变量X的每一个可能值对其数学期望$E(X)$的偏差的平方的数学期望。方差描述了随机变量X对数学期望$E(X)$的分散程度，用$D(X)$表示，即

$$D(X) = E\left[\left(X - E(X)\right)^2\right] \tag{1.17}$$

对离散型随机变量，方差表示为

$$D(X) = \sum_{i=1}^{\infty} (x_i - \mu_x)^2 p_i \tag{1.18}$$