绪 论

一、大学物理实验课程体系、内容及要求

大学物理实验是高等院校理工科专业一门重要的基础实验课程，是对学生进行科学实验基本训练的一门独立的必修基础课，同时又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．现代科学技术迅速发展，对大学生的培养必须要与之相适应．因此要求对物理实验课程教学内容、教学方法、教学体系的改革，着重强化实验基本技能、方法和物理实验思想的训练，同时注意培养和提高科学实验素质，重点突出能力培养和创新意识训练．基础性物理实验教学内容以现代技术的观点为指导，改变经典实验教学思想的侧重点，使经典实验内容现代化，使物理实验内容充满近代的气息．因此要求物理实验教学内容整个体系以培养目标为重点，安排为三大模块，即实验结果的数据处理能力，基本训练能力，设计性实验和创意性实验能力．在教学实践过程中，以五个结合为核心，全面促进实验技能及能力素质的提高．

1．传统实验教学方法与现代化教学手段相结合

在基础性物理实验教学内容中，根据实验的内容性质，分别引入了现代化教学手段，如在灵敏电流计、牛顿环、旋光仪、衍射光栅、迈克耳孙干涉仪等实验中引入了 CCD 摄像及显示系统，在有些实验中采用电化教学手段及 CAI 课件等．由于现代化教学手段的引入，增加了授课的信息量，拓宽了现代科技知识面，增强了内容的直观性和效果．

2．将物理实验思想的培养与实验技能的训练相结合

作为基础课的物理实验，其目的与作用并不是粗略地去验证理论，而是在受到基本实验技能训练的同时，培养科学实验素质，从实践中培养和提高自己分析问题和解决问题的能力．在实验内容的安排上，注重实验设计基本思想和实验技能相结合．例如，可拆卸、装调方便的固体激光器和用于测量参数的固体激光器相互并存；板式双臂电桥和箱式双臂电桥相互并存等．前者突出实验的设计思想，后者突出基本实验技能及应用的训练．

3．训练基础物理实验技能的同时，注重能力素质培养

物理实验课程是理工科学生进入大学后受到系统的实验方法和实验技能训练的重要开端，它贯穿着辩证唯物主义思想，把理论与实践、方法与技能相结合，促进学习者既动手又动脑，尤其能加强能力素质和创新意识的培养．因此在加强

基本物理实验训练的同时，要有自我思维能力的培养，对于通过思维得到的概念、思想、设计、方法等，经过“再生性思维”，重新运用以往学会的知识办法来解决新的问题．例如，讲授衍射光栅实验时，除以测量光栅常数和波长为基本训练内容外，应该思考能否用两块光栅常数相同的光栅构成光栅腔；迈克耳孙干涉仪实验中除测波长和波长差等内容外，能否测定薄膜厚度，用白光能否形成白光干涉；弦线上的驻波实验中，除测定频率等内容外，能否用此原理及方法测定固体流场和流体流场的速度等．因此学生在得到基本内容和方法训练后，经过积极的再思维，有利于提高科学实验素质和创新意识．

4．考试与能力素质培养相结合

考试是促进学生再学习和再深化的过程，科学和合理的考试方法有利于促进学生的能力和素质培养．各校根据具体情况确定实验课程总学时数，但原则上不少于理论课时的 1/2，实验内容可从实际需要出发，灵活选择本书实验项目，分两学期完成．第一学期授课内容为测量误差及数据处理方法和力学、热学、电学实验等，期终考试为开卷式笔试，考试目的是为了对实验数据作出科学地评价，并能结合具体实验的原理、方法、步骤、技巧等，在实验中提高测量的准确度和精确度．第二学期授课内容为光学、近代物理及综合实验，考试形式为设计性实验，设计性实验题目的数目一般在 16～20个,在考试前三周公布,并任意抽签,抽到哪个试题就设计哪个实验．考试目的除要求掌握实验原理、方法、技巧等外，还必须熟练掌握使用各种仪器设备，了解仪器的性能指标，具备一定的分析问题和解决问题的能力．

5．课堂教学与课外科技活动相结合

创意性实验是启发学生思维和培养学生创新意识的一个重要手段，也是培养科学实验基本素质，使学生真正掌握实践本领，课堂教学与课外科技活动相结合的教学模式．这种模式有利于挖掘和培养学生内在潜质，有利于激发学生个性发展，有利于促使学生在受到科技工作基本素质训练的同时，养成严肃认真、实事求是的科学作风，从而为培养高素质并具有创新意识的人才奠定基础．

在基础物理实验的基础上，以培养研究型学习能力是培养创新能力的重要基础这一主线，让学生尽早参加科研训练．在参阅许多资料的基础上，结合本校物理实验中心科研项目及科研成果，在课程中安排了创意性实验（研究型实验），其内容面广，内涵丰富，内容新颖，尤其是工程技术中的单元技术研究内容，更具有启发性、研究性、实用性,以求更好地做到理论与实际相结合．

二、物理实验课程基本训练的有关程序

物理实验课程通过对实验现象的观察、分析和对物理量的测量，加深对物理学原理的理解．因此实验教学的基本思想和程序归结为：实验思想→实验仪→

实验条件→ 实验方法→ 实验测量→ 实验分析→ 实验结果数据处理根据这一教学思想和程序，学生遵循的基本学习程序可分为以下三个阶段：

1. 实验前预习

由于实验课课内时间有限，因而必须预先熟悉实验内容，否则要在短短的课内时间完成整个实验无疑是困难的. 在实验之前，应对实验原理、待测物理量、实验要获得的结果等做到胸有成竹. 若事先全不了解，只是机械地照教材中实验步骤，看一步动一步，虽然得到了实验数据，但却不了解其物理意义，收获是不会大的，因此必须作好预习. 预习一般以理解教材所述原理为主，并大致了解实验具体步骤. 为了使测量结果眉目清楚，防止漏测数据，应按实验要求画好数据表格，注上文字符号代表的物理量和单位，并确定测量次数.

预习时，要写好预习报告. 预习报告内容主要包括：

(1) 实验名称；

(2) 实验目的；

(3) 仪器设备；

(4) 基本原理，包括重要的计算公式、电路图、光路图及简要的文字说明；

(5) 数据草表.

其中数据草表是供实验时记录原始数据用的.

2. 进行实验

实验正式进行前，首先要熟悉一下将要使用的仪器、设备的性能以及正确的操作规程，切忌盲目操作；其次要全面地想一想实验操作程序，不要急于动手，因为程序错一步或调错一次，都有可能使整个实验前功尽弃.

实验中要注意对现象的观察，尤其对所谓的“反常”现象，更要仔细观察分析，不要单纯地追求“顺利”；要学习对观察到的现象和测得的数据随时进行判断，以确定正在进行的实验过程是否正常合理；对实验过程中出现的故障，要学会及时排除.

每次测量后应立即将数据记录在数据草表中，并要注意正确确定数据的有效位数. 当实验结果与实验条件有关时，还要记下相应的实验条件，例如当时的室温、湿度、大气压强等

实验结束时，要把测得的数据交给指导教师检查签字. 对不合理的或错误的实验结果，经分析后还要补做或重做. 离开实验室前，要整理好使用过的仪器，做好清洁工作.

3. 写实验报告

书写实验报告是实验完成后的全面总结，要以简单扼要的形式将实验结果完整而又真实地表达出来. 实验后要及时写好实验报告，写报告要使用统一规格的实验报告纸，要求文字通顺、字迹端正、图表规范、结果正确、讨论认真.

一份完整的实验报告通常包括下述内容：

(1) 实验名称；

(2) 实验目的；

(3) 仪器设备；

(4) 基本原理，包括重要的计算公式、电路图、光路图及简要的文字说明；

(5) 数据表格及数据处理（包括计算和作图），这里的“数据表格”不同于预习报告中的“数据草表”，应该另行正规画出，并把数据草表记录的原始数据填人数据表格中；

(6) 实验结果；

(7) 问题讨论；

(8) 预习报告中的“数据草表”，应作为附件，附于实验报告之后，交实验报告时一并交给指导教师.

以上(1)~(4)部分内容，如无大的变动，就可以使用预习报告中的相应内容代替，而不必重写.

附　实验报告范例

学号××××××××　　　　姓名×××

一、实验名称：衍射光栅.

二、实验目的：测定光栅常数 d；用已知光栅常数的光栅测量未知谱线的波长.

三、实验仪器：JJY 型分光计（最小读数 $1'$）、衍射光栅、汞灯（$\lambda_{绿}=546.07\ \mathrm{nm}$）.

四、实验原理：当平行光垂直光栅入射时，满足光栅公式 $d\sin\varphi=k\lambda\,(k=0,\pm1,\pm2,\cdots)$ 的光形成明线

由上式，如果已知波长 λ 和衍射级次 k,就可根据测得的衍射角 φ 求出光栅常数 d 如果知道光栅常数 d 和衍射级次 k,就可根据测得的衍射角 φ 求出相应光谱线的波长.

为了保证以平行光入射与出射，并减小测量误差，在测量前必须将分光计调节到使用状态.分光计调好的标准为：平行光管能够发出平行光；望远镜能够接收平行光；平行光管光轴、望远镜光轴都要垂直于仪器的旋转主轴.

五、实验步骤

1. 调节分光计.

2. 将光栅放置在载物平台上，并注意让它与平行光管垂直，使光栅条纹垂直于旋转主轴.

3. 测出绿谱线（$\lambda_{绿}=546.07\ \text{nm}$）$\pm1$ 级和 ±2 级的衍射角，由光栅公式求出光栅常数 d.

4. 测出蓝谱线 ±1 级和 ±2 级衍射角，根据前面测得的 d 和光栅公式,求出蓝谱线的波长 $\lambda_{蓝}$.

六、实验数据

（一）测定光栅常数 d

亮纹级数	读数			衍射角		$\sin\bar{\varphi}_k$	λ/nm	d/nm	$\bar{d}$/nm
	θ	θ'	平均	φ_k	$\bar{\varphi}_k$				
$k=0$	50°18′	230°17′	140°18′						
$k=+1$	30°5′	210°5′	120°5′	20°13′	19°13′	0.321 9	546.07	1.659×10^3	1.662×10^3
$k=-1$	68°32′	248°32′	158°31′	18°13′					
$k=+2$	8°48′	188°46′	98°47′	41°31′	40°59′	0.656 0		1.665×10^3	
$k=-2$	90°45′	270°46′	180°46′	40°28′					

（二）测定光波波长

亮纹级数	读数			衍射角		$\sin\bar{\varphi}_k$	d/nm	λ/nm	$\bar{\lambda}$/nm
	θ	θ'	平均	φ_k	$\bar{\varphi}_k$				
$k=0$	50°18′	230°17′	140°18′						
$k=+1$	34°23′	214°21′	124°22′	15°56′	15°13′	0.262 6	1.662×10^3	436.4	436.8
$k=-1$	64°47′	244°48′	154°48′	14°30′					
$k=+2$	16°52′	196°54′	106°53′	33°25′	31°45′	0.526 2		437.2	
$k=-2$	80°23′	260°22′	170°23′	30°5′					

计算对于标准值的相对误差

$$\lambda_0=435.8\ \text{nm}$$

$$E=\left|\frac{\bar{\lambda}-\lambda_0}{\lambda_0}\right|\times100\%=0.2\%$$

七、问题讨论

1. 光栅光谱和棱镜光谱有哪些不同之处？在上述两种光谱中，哪种颜色的光偏转最大？

答：光栅光谱和棱镜光谱采用不同的分光器件——衍射光栅和三棱镜得到. 前者依据光栅方程 $d\sin\varphi=k\lambda(k=0,\pm1,\pm2,\cdots)$;后者根据不同波长的光在玻璃中的折射率不同（色散）. 在光栅光谱中，对于同一衍射级次 k，λ 越大 φ 也越大，即红光偏转最大；在棱镜光谱中，由于 λ 越大折射率越小，偏向角也越小，故紫光偏转最大.

2. 当狭缝太宽或太窄时将会出现什么现象？为什么？

答：狭缝太宽时谱线太亮、太宽，所以会造成较大的测量误差；狭缝太窄时谱线亮度不够，甚至会造成找不到谱线. 因此应该使狭缝宽窄合适.

3. 入射光未垂直照射光栅所造成的后果：

从本次实验数据来看，k 为正值时的衍射角均大于 k 为负值时的衍射角. 通过分析可知，这是由于入射光未垂直照射光栅所造成的，由此给实验带来了系统误差.

当光线以 θ 角入射光栅时，光栅公式变为

$$d(\sin\varphi + \sin\theta) = k\lambda \qquad (k = 0, \pm 1, \pm 2, \cdots)$$

由于对正、负 k 级而言，θ 值为一正一负，所以造成两边衍射角不相等. 如果只取一侧的衍射角，代入 $d\sin\varphi = k\lambda$ 计算，则误差较大. 在本实验中，由于把正、负同级衍射角取了平均，部分地消除了由此造成的误差. 在测波长时，由于入射角 θ 不变，所以进一步抵销了由此造成的误差.

但是从操作技能等方面考虑，今后应尽量避免类似情况发生

附　原始数据草表（略）

点评：这是一份比较好的实验报告.

1. 在报告首页上方，写明班级、学号、姓名，可以避免与别人的报告相混，也便于教师登记成绩，发还报告.

2. 写明实验日期、时间，可供今后查阅. 如能进一步注明环境条件，如气温、天气等，则会有更大的参考价值.

3. 仪器一栏写明了仪器型号，往往可以由此知道仪器的极限误差以及使用方法.

4. 用自己的语言对原理作了概述，有主要公式. 如能画上光栅衍射示意图则更佳.

5. 数据表格清晰. 在记录及处理数据时，遵照了有效位数运算规则. 如，由于仪器误差约为 $1'$，φ 在 $15°\sim42°$ 范围内，故 $\sin\varphi$ 的末位在小数点后第 4 位；由于 $d = \dfrac{k\lambda}{\sin\varphi}$，$\lambda$ 为 5 位，$\sin\varphi$ 为 4 位，故 d 也取 4 位有效位数，等等.

6. 发现了实验数据中的问题，并进行了一定的分析. 这是一种值得提倡的科学态度. 千万不能看到数据中的问题后，采用篡改数据的自欺欺人的办法. 如果能进一步作定量的分析，收获可能会更大一些.

7. 报告完整，并把原始数据附在报告最后一起交来，便于核对数据.

三、物理实验规则

为了保证基础实验教学的正常进行，培养同学严肃认真、实事求是的科学态度，培养善于思考、勤于动手的学习作风，特制定以下规则，望大家严格遵照执行：

1. 实验前要充分做好预习准备工作，必须按要求写好预习报告，否则不得参加实验. 上次实验的报告应在下次实验前交指导老师.

2. 实验中，应严格遵守课堂纪律和实验规程，正确操作，认真观测. 要保持室内安静、整洁，严禁喧哗、嬉闹，禁止吸烟，禁止乱涂乱画，禁止随地吐痰，保证有良好的实验环境.

3. 对实验中使用的仪器设备及实验结果，要作实事求是的分析，反对掩盖矛盾或弄虚作假的学风. 原始数据应经老师审阅签字，再整理仪器恢复原状，方可离开实验室. 交实验报告时，实验中测量的原始数据必须附上.

4. 要自觉爱护仪器设备，实验中要注意技术安全，未经教师许可不要擅自接通仪器电源等，光学仪器的玻璃加工面不要用手去触摸，不允许擅自擦试，各组仪器不得擅自调换.

5. 因故不能准时到课的学生，必须在课前向老师请假，经准许后方可安排补做实验，否则按旷课处理，缺交实验报告者，不准参加实验考试，实验成绩按不及格处理.

第 一 篇

测量误差 结果评定 常用实验方法

第 1 章 测量误差及其数据处理方法

1.1 测量与误差的关系

一、测量(measurement)

测量是人类认识自然改造自然必不可少的手段.所谓测量，就是用一定的测量工具或仪器，通过一定的方法，直接或间接地得到所需要的量值.例如我们要知道某一物体的长度，可借用长度测量工具（米尺、卡尺、千分尺、激光干涉测长仪等）直接对物体测量.如果要知道一个圆柱体的密度，根据公式：

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{4m}{\pi D^2 H} \tag{1.1.1}$$

可借用长度测量工具测量物体的高度 H 和直径 D，借用天平称衡物体的质量 m，然后通过式(1.1.1)，可间接得到所需要的量值 ρ.依照测量方法的不同，可将测量法分为两大类：

(1) 直接测量(direct measurement)

直接测量是将待测量与预先标定好的仪器、量具进行比较，直接从仪器或量具上读出量值大小的测量.例如,用长度测量工具测长度、宽度、高度、半径、直径等，用电表测量电压、电流，用秒表或数字毫秒计、电子钟等测量时间，用功率计或能量计测量激光输出的功率或能量等.

(2) 间接测量(indirect observation)

需先由直接测量获得的数据，利用已知的函数关系经过运算才能得到待测量数值.例如某一物体面积 $S = ab$,激光测距方程 $L = \frac{1}{2}ct$,那么，面积 S 和距离 L 都是间接测量量值，长度 a 宽度 b 和时间 t 都是直接测量量值.

二、误差(error)

1. 误差的定义

测量的误差等于测量结果减去被测量的真值，即

$$\text{测量误差} = \text{测量值} - \text{真值}$$

或

$$\Delta N = N_{测} - N_{真} \tag{1.1.2}$$

上式所定义的误差反映的是测量值偏离真实值的大小和方向.所谓 $N_{真}$,对任何一个物理量，在一定条件下都具有一定的大小，这是客观存在的，但实际上 $N_{真}$ 是一个理想的概念，因为在实际测量中不可避免地要存在误差，一切测量结果都含有误差，同一个物理量，即使同一个人，用同一台仪器，在相同的条件下进行多次测量，各次测量结果一般也不完全相同，更不等于测量的 $N_{真}$ 值，因此测量与误差是形影不离的.

2. 误差来源

（1）仪器误差(instrument error)

指在测量时由于所使用的测量仪器仪表不准确引起的误差.误差大小根据仪器本身的灵敏度来确定，但任何仪器都存在误差

（2）环境误差(environment error)

由于测量仪器偏离了仪器本身规定的使用环境或者测量条件，例如气流扰动，温度的微小起伏，电源电流、电压、频率、外界电磁场等等因素的影响，都会使测量产生误差.

（3）测量方法误差(measurement error of a method)

这种测量误差是由于测量方法不完善及所依据的理论不严密而产生.因此，凡是在测量结果的表达式中没有得到反映，而在实际测量中又起作用的一些因素所引起的误差，例如高灵敏度测量仪器规定在洁净室使用却在一般实验室使用，使用的电源设备有绝缘漏电，测量激光脉冲宽度应该要用静电屏蔽而不用寄生电势，引起与接触电阻的压降等，都会产生方法（或理论）误差.

（4）人员误差(itself in error)

这是由于实验者的主观因素和操作技术引起的分辨能力、感觉器官灵敏度的不完善，操作不熟练，估计读数始终偏大或偏小等，可能会造成误判而产生的人员误差.

根据误差产生的原因以及误差的性质和来源，对误差进行分类，大致可以分为三类,即系统误差,随机误差,粗大误差,下面分别介绍.

三、误差的分类

1. 系统误差(system error)

系统误差是指在同一被测量的多次测量过程中，保持恒定或以可预知方式变化的测量误差的分量.系统误差及其产生的原因可能已知，也可能未知.系统误差包括已定系统误差和未定系统误差.已定系统误差是指符号和绝对值已经确定的系统误差；未定系统误差是指符号或绝对值未经确定的系统误差.

系统误差的特征是其确定性（恒定或以可预知的方式变化）. 系统误差的来源主要有仪器的固有缺陷（例如电表的示值不准、零点未调好、等臂天平的两臂不相等），环境因素（如温度、压强偏离标准条件），实验方法的不完善或这种方法依据的理论本身具有近似性（如伏安法测电阻时没有考虑电表内阻的影响、称质量时未考虑空气浮力的影响），实验者个人的不良习惯或偏向（如有的人习惯于侧坐斜坐读数，使读到的数值总是偏大或总是偏小），以及动态测量的滞后等.

由于系统误差在测量条件不变时有确定的大小和正负号，因此在同一测量条件下多次测量求平均并不能减小或消除它.

对于系统误差，必须找出其产生的原因，针对原因去消除或引入修正值对测量结果进行修正. 系统误差的处理是一个比较复杂的问题，没有一个简单的公式可以遵循，需要根据具体情况作出具体的处理. 首先要对误差进行判别，然后要将误差尽可能地减小到可以忽略的程度. 这需要实验者具有相应的经验、学识与技巧. 一般可以从以下几个方面进行处理：

(1) 检验、判别系统误差的存在；

(2) 分析造成误差的原因，并在测量前尽可能消除；

(3) 测量过程中采取一定方法或技术措施，尽量消除或减小系统误差的影响；

(4) 估计残有系统误差的数值范围，对于已定系统误差，可用修正值（包括修正公式和修正曲线）进行修正；对于未定系统误差，尽可能估计出其误差限值，以掌握它对测量结果的影响.

我们将在今后的某些实验中，针对具体情况对系统误差进行分析和讨论.

2. 随机误差(random error)

随机误差是指在同一量的多次测量过程中，以不可预知方式变化的测量误差的分量.

根据随机误差的特点可以知道，随机误差不可能修正. 随机误差就个体而言是不确定的，但其总体（大量个体的总和）服从一定的统计规律，因此可以用统计方法估计其对测量结果的影响.

随机误差的特征是其随机性. 随机误差的主要来源有测量仪器、环境条件和测量人员. 这些因素对测量会产生微小的影响，而这些影响往往是随机变化的.

大量的随机误差服从正态分布，其分布曲线如图 1.1.1 所示. 在图中，纵坐标 P 表示随机误差出现的概率密度，横坐标 δ 表示随机误差，这条连续对称的曲线称为随机误差的正态分布曲线，或称为高斯分布曲线，其方程式为：

$$P(\delta)=\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}\rho^{\left(-\frac{\delta^2}{2\sigma^2}\right)} \tag{1.1.3}$$

式中 σ 为标准偏差. 对于如何来理解图 1.1.1 中的正态分布曲线，从而更好地研

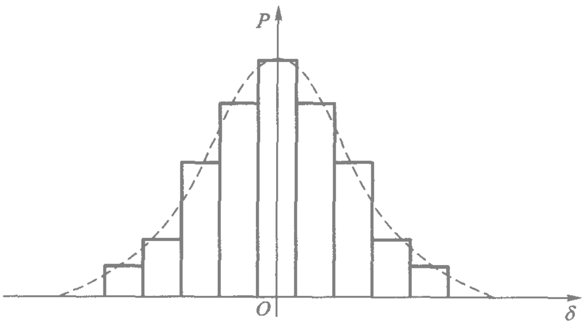

图 1.1.1　正态分布曲线示意图

究随机误差的分布特性，可以作这样的一个实验来说明．在同一测量条件下，用一级千分尺测量某一工件的内径，重复测量 k 次，获得测量值为 $R_1, R_2, \cdots, R_k$（测量次数 k 足够大），并设被测量的真值为 R_0，那么可得到相应各次测量值的随机误差为：

$$\delta_1 = R_1 - R_0,\ \delta_2 = R_2 - R_0, \cdots, \delta_k = R_k - R_0$$

若将上述得到的随机误差（$\delta_1, \delta_2, \cdots, \delta_k$）按它们的大小和符号进行整理后，并将落入某一误差区域（$\delta_i \sim \delta_{i+1}$）的次数用长方形面积表示，则可以得到图 1.1.1，若将误差区域定得很小，就可以得到图中虚线所表示的曲线．服从正态分布的随机误差曲线具有以下属性：

(1) 单峰性：绝对值小的随机误差出现的概率比绝对值大的随机误差出现的概率要大．

(2) 对称性：随机误差绝对值相等的正负误差出现的概率相同

(3) 有界性：在一定测量条件下，误差的绝对值不超过一定限度．若随机误差的绝对值超过某一定值后，出现的概率为零，这一定值称为极限误差．

随着测量次数的增加，随机误差的算术平均值趋向于零．一般说来，适当增加测量次数求平均可以减小随机误差．

3. 粗大误差(missing error)

粗大误差又称粗差、疏失误差等，是明显超出规定条件下预期的误差．引起粗大误差的原因有：错误读取示值；使用有缺陷的计量器具；计量器具使用不正确或环境的干扰等．

在测量中，应该避免粗大误差的出现．在处理测量数据时，应首先检出含有粗大误差的测得值——异常值，并将它剔除．

四、 测量结果表示

为了评价一个测量结果的优劣，常用绝对误差和相对误差表示．绝对误差反

映了误差本身的大小，而相对误差反映了误差的严重程度.

1.绝对误差(absolute error)

定 义 ： 绝 对 误 差 = 测量值 - 真值

或

$$\Delta N = N_{测} - N_{真}$$

测量结果

$$N_{真} = N_{测} \pm \Delta N \tag{1.1.4}$$

2.相对误差(relative error)

定义：

$$相对误差 = \frac{|绝对误差|}{真值}$$

或

$$E = \frac{|N_{测} - N_{真}|}{N_{真}} = \frac{|\Delta N|}{N_{真}} \tag{1.1.5}$$

相对误差也可用百分数表示：

$$E = \frac{|\Delta N|}{N_{真}} \times 100\%$$

故又称百分误差.

必须注意，绝对误差大的，相对误差不一定大.例如：

$$L_1 = 25.00\ \text{mm} \qquad \Delta L_1 = 0.05\ \text{mm}$$

$$L_2 = 2.50\ \text{mm} \qquad \Delta L_2 = 0.01\ \text{mm}$$

$$L_3 = 2.5\ \text{mm} \qquad \Delta L_3 = 0.1\ \text{mm}$$

根据式(1.1.5)可得

$$E_1 = 0.2\%$$

$$E_2 = 0.4\%$$

$$E_3 = 4\%$$

从上述数据可知：$\Delta L_3 > \Delta L_1 > \Delta L_2$，而 $E_3 > E_2 > E_1$.可见绝对误差的大小与相对误差的大小之间没有必然的联系.

五、精密度、正确度与准确度

精密度、正确度和准确度（又称精确度）都是评价测量结果好坏的一个物理量，分别用来反映随机误差、系统误差和综合误差大小.

1.精密度：表示测量结果中随机误差大小的程度.这种测量是指在同一测量条件下对被测量物体进行多次测量，获得一组测量结果数据的重复性（或离散性）程度.

2.正确度：表示测量结果中系统误差大小的程度.这种系统误差是指同一物理量在不同测量中所得各次测量值与真值的接近程度.它反映了在规定条件

下，测量结果中所有系统误差的综合.

3.准确度：表示测量结果与被测量的（约定）真值之间的一致程度.它反映了在同一测量条件下系统误差和随机误差综合影响的反映

在图1.1.2(a)中的情况属于随机误差小、系统误差大，故可以说成“精密度高、正确度不高”图1.1.2(b)中的情况属于系统误差小，随机误差大，故可以说成‘正确度高、精密度不高”图1.1.2(c）中的情况属于随机误差与系统误差都小，故可以说成“精密度与正确度都高”.显然，只有在图1.1.2(c）的情况下，准确度才高，而图1.1.2(a)、(b)两种情况的准确度都不高.

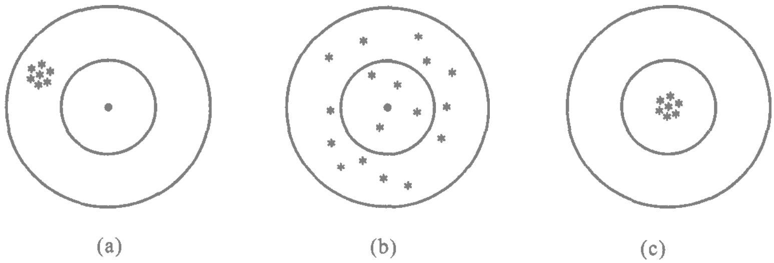

图1.1.2　关于精密度、正确度、准确度的示意图

1.2　测量结果误差估算及评定方法

测量与误差不可分离，但如何准确估算及评定测量结果，对测量值作出科学的评价，这是误差理论要解决的一个重要问题对测量结果评定一般有三种方法,即算术平均偏差、标准偏差(均方根偏差)和不确定度.

一、算术平均偏差和标准偏差

为了减少测量误差，用最佳值代替真值.统计理论指出，多次测量算术平均值 N 是最佳值或称近似值.因此，在可能情况下，总是采用多次测量的算术平均值 N 作为测量结果，它是真值的最好近似.那么算术平均值 N 代替真值 $N_{真}$ 可靠性如何，要对它进行估算和评定（这里约定系统误差和过失误差已消除或修正，只剩下随机误差）.

1.算术平均偏差（arithmetic mean deviation)

如对某一物理量测量 K 次，求得算术平均值为 N，则算术平均偏差用 $\bar{d}$ 表示：

$$\bar{d}=\frac{1}{K}(|N_1-\overline{N}|+|N_2-\overline{N}|+|N_3-\overline{N}|+\cdots\cdots+|N_K-\overline{N}|)$$

$$= \frac{1}{K}\sum_{i=1}^{K} | N_i - \overline{N} | \qquad (1.2.1)$$

式中，N_i 为第 i 次测量值.

2. 标准偏差（均方根偏差）(standard deviation, mean square deviation)

根据统计误差理论及实践，在测量过程中产生的误差是遵循正态分布的.在描述服从正态分布的测量值及随机误差时，采用了数学上数学期望的算术平均值和方差的开方，即均方根偏差，由于我国常采用均方根偏差作为精密度的评定标准，因此常称为标准偏差，通常用符号 σ 表示.从正态分布曲线图 1.1.1 和方程式(1.1.3) 分析，从中可知，对于同一测量值的误差 δ_i，标准偏差 σ 值愈大，则所对应的 $y=P(\delta_i)$愈小，曲线陡度小，较平坦，若 σ 值小，则 $y=P(\delta_i)$值大，曲线陡度大，因为分布曲线以下与横坐标轴 δ 所围面积表征全部随机事件的概率为 1(满足归一化条件).因此当 δ 表示随机误差，P 为随机误差出现的概率密度时，那么随机误差的正态分布曲线以下的面积，便描述了全部随机误差出现的总概率，因此有：

$$\int_{-\infty}^{+\infty} P(\delta)\mathrm{d}\delta = 1$$

将式(1.1.3)代入上式，则

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \rho^{(-\frac{\delta^2}{2\sigma^2})}\mathrm{d}\delta = 1 \qquad (1.2.2)$$

上式表示各种测量值或相应的各种测量误差在区间（$-\infty$，$+\infty$）内出现的概率为 100%，其数值等于曲线下的总面积.

对于式(1.2.2) 中的概率积分可查阅概率积分函数表，由表可知当随机误差 $\delta=\pm 1\sigma$，也就是说在置信区间$[-\sigma, +\sigma]$ 内的置信概率为 68.3%，或者说置信区间$[-\sigma, +\sigma]$ 内包含真值的概率为 68.3%，同理 $\delta=\pm 2\sigma$ 时，在置信区间$[-2\sigma, +2\sigma]$ 内的置信概率为 95.4%，$\delta=\pm 3\sigma$ 时，在置信区间$[-3\sigma, +3\sigma]$ 内的置信概率为 99.7%. 通常将 $\delta=3\sigma$ 称为随机误差的极限误差，即

$$\delta_{\min} = \pm 3\sigma \qquad (1.2.3)$$

这就是随机误差的有界性，如图 1.2.1 所示.图中 N 为测量值.通常由于测量次数有限（一般最多在几十次），因此认为出现大于 3σ 误差的概率等于零.

从以上分析可知，标准偏差描述了随机误差概率分布的分散性.若对一个物体进行重复多次测量，对于一组测量值，就可以用其标准偏差来描述测量的精密度.

用标准偏差 σ 来估算 N 代替 $N_{真}$ 的可靠性程度有两种形式：

(1) 测量列的实验标准差

在有限次测量和被测量真值未知情况下，可利用贝塞尔公式

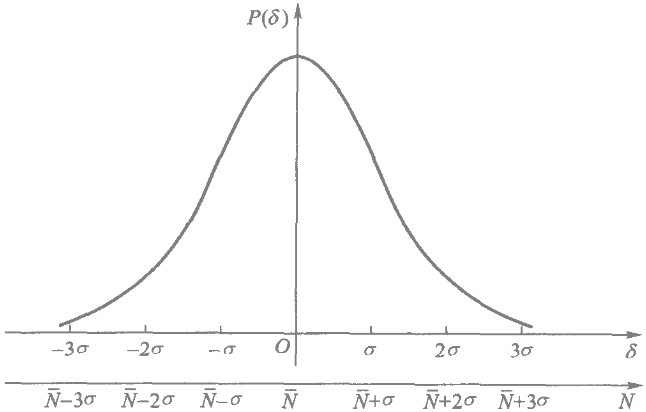

图 1.2.1　正态分布函数图形示意图

$$\sigma(N)=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{K}(N_i-\overline{N})^2}{K-1}} \tag{1.2.4}$$

上式也称测量列的实验标准差，它是用残差来估算测量列中每次测量的标准差，上式中 N_i-N 称为第 i 个测量值的残余误差，简称残差．由式(1.2.1)可知，当测量次数 K 增大时，分母增大，但同时残差的个数也增加，因而分子也相应增大．统计误差理论证明，K 增大不能减小测量列的标准差．当 K 小时，$\sigma(N)$起伏较大；当 K 大时，$\sigma(N)$ 趋于一个稳定值．

(2）平均值的标准差

在同一条件下对某物理量进行多次测量，其平均值的标准差为

$$\sigma(\overline{N})=\frac{\sigma(N)}{\sqrt{K}}=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{K}(N_i-\overline{N})^2}{K(K-1)}} \tag{1.2.5}$$

从上式可以进一步看出，标准偏差 σ 是一个描述测量结果的离散程度的统一参量，用它评定测量数据的随机误差有许多优点，例如有相当的稳定性，σ 值随测量次数 K 值变化比较小；它以平方计值，因此与个别误差的符号无关，而且能反映数据的离散程度；它与最小二乘法相吻合等．在测量值服从正态分布且消除或修正系统误差的前提下，对于一倍标准偏差 σ，测量结果在 $N-\sigma$ 到 $N+\sigma$ 区间范围内包含真值 $N_{真}$ 的可能性为 68.3%，或称为置信概率为 68.3%．对于二倍的标准偏差 2σ，测量结果在 $\overline{N}-2\sigma$ 到 $\overline{N}+2\sigma$ 区间范围内包含真值 $N_{真}$ 的可能性为 95.4%；三倍的标准偏差 3σ，则测量结果在 $\overline{N}-3\sigma$ 到 $\overline{N}+3\sigma$ 区间范围内包含真值 $N_{真}$ 的可能性为 99.7%．通常把测量值误差 $\pm3\sigma$ 称为极限误差．对于