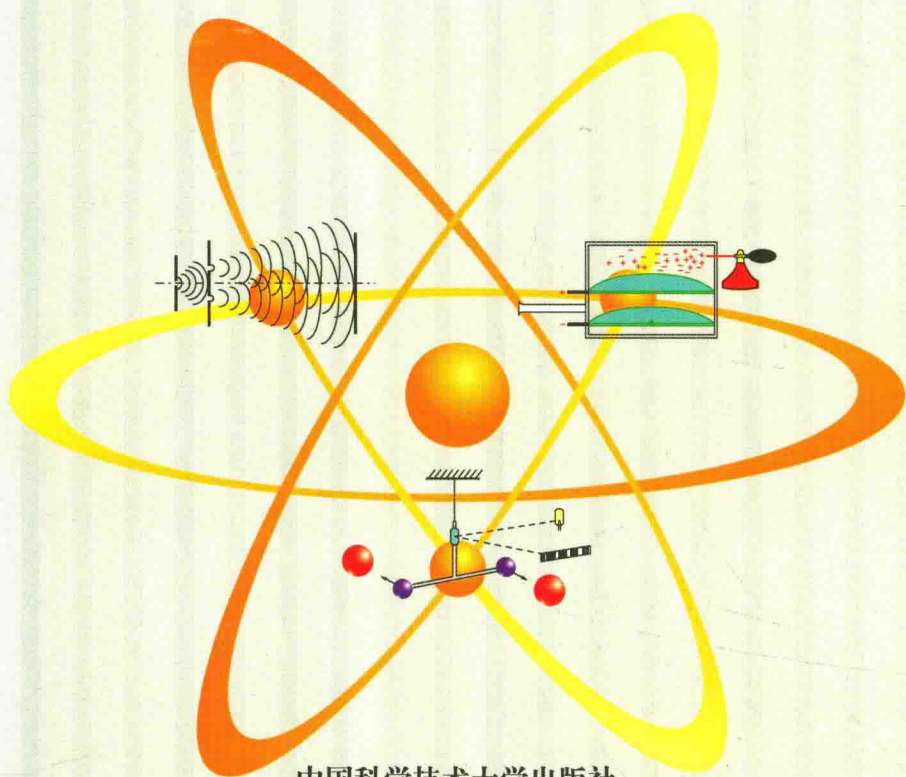




# 中学奥林匹克竞赛 物理实验讲座

江兴方 郭小建 编著

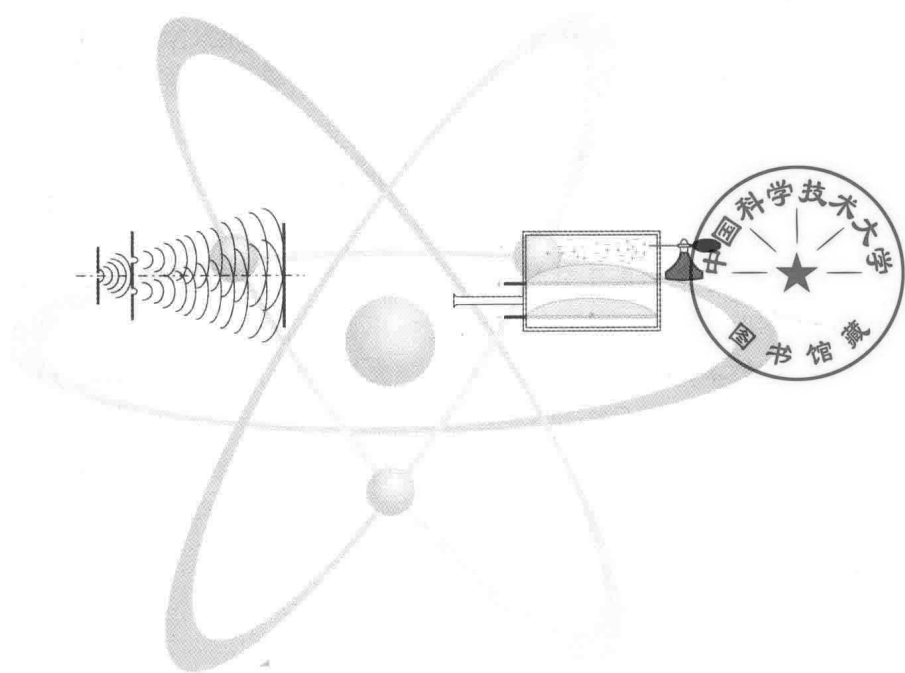


中国科学技术大学出版社



# 中学奥林匹克竞赛 物理实验讲座

江兴方 郭小建 编著



中国科学技术大学出版社

## 内 容 简 介

本书共 24 讲,从物理实验的本质出发,较系统地介绍测量、不确定度、不确定传递方法、实验数据的处理方法、实验结果的正确表述方法;从基本的物理实验入手,包括金属弹性模量的测定、重力加速度的测量、气轨上小摩擦情况下各种实验、固体线胀系数的测量、液体的表面张力与比热容的测量、示波器的使用、声速测量、线性电阻与非线性电阻的测量、惠斯通电桥测量电阻、电表的改装与校准、多用表的使用、用霍尔元件测量磁场、亥姆霍兹线圈中的磁场、薄透镜的测定、三棱镜折射率的测定、光的等厚干涉牛顿环实验、夫琅禾费衍射实验、氢原子光谱实验等,每个实验后均有“实验联想”栏目,目的在于通过简单的基本的物理实验了解更多的相关的物理知识与相关的实验,用物理的思想去审视当今所发生的物理现象。

本书可作为参加物理竞赛的中学生的参考书,也可供大学生创新研究使用。

### 图书在版编目(CIP)数据

中学奥林匹克竞赛物理实验讲座/江兴方,郭小建编著. —合肥:中国科学技术大学出版社,2015.7

ISBN 978-7-312-03715-3

I. 中… II. ①江… ②郭… III. 中学物理课—实验—教学参考资料 IV. G634.75

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 098746 号

出版 中国科学技术大学出版社  
安徽省合肥市金寨路 96 号,230026  
<http://press.ustc.edu.cn>  
<http://shop109383220.taobao.com>

印刷 安徽联众印刷有限公司

发行 中国科学技术大学出版社

经销 全国新华书店

开本 787 mm×1092 mm 1/16

印张 13.25

字数 323 千

版次 2015 年 7 月第 1 版

印次 2015 年 7 月第 1 次印刷

定价 33.00 元

# 序

饮水思源。2013年12月15日,中国科学技术大学范洪义教授应邀来到常州大学作报告。笔者送给范老师一本在南京大学出版社出版的《物理演示实验》图书,他很高兴,回合肥后向肖向兵编辑推荐笔者写《中学奥林匹克竞赛物理实验讲座》。20天后基本内容确定,200天后初稿完成。

知其然,知其所以然。知识很重要,了解其来龙去脉的道理更重要。在当今信息时代,各种各样的信息以各种方式在时刻影响着我们,作为风华正茂的学生,如何用物理的思想审视这一切,的确是非常困难的。一部分人由于无法解释这些现象背后的道理而囫囵吞枣地接受;一部分人因为众说纷纭而百思不得其解;一部分人善于站在巨人的肩膀上,用自己的思想去审视当今所发生的物理现象,并且采用明显的简单的物理实验去验证自己的想法,知其所以然。

本书共24讲,从物理实验的本质出发,较系统地介绍测量、不确定度、不确定传递方法、实验数据的处理方法、实验结果的正确表述方法;从基本的物理实验入手,包括金属弹性模量的测定、重力加速度的测量、气轨上小摩擦情况下各种实验、固体线胀系数的测量、液体的表面张力与比热容的测量、示波器的使用、声速测量、线性电阻与非线性电阻的测量、惠斯通电桥测量电阻、电表的改装与校准、多用表的使用、用霍尔元件测量磁场、亥姆霍兹线圈中的磁场、薄透镜的测定、三棱镜折射率的测定、光的等厚干涉牛顿环实验、夫琅禾费衍射实验、氢原子光谱实验等,每个实验后均有“实验联想”栏目,目的在于通过简单的基本的物理实验了解更多的相关的物理知识与相关的实验,用物理的思想去审视当今所发生的物理现象。

另外,笔者精心整理了大量与本书中的实验有关的视频材料,并未随书出版,读者可向责任编辑(QQ731827650)索要。

由于当今时代信息量十分丰富,编著适合于广大中学生奥林匹克竞赛的辅导教材任重而道远,书中难免挂一漏万,希望读者批评指正,以便在今后的著作中改进。

江兴方

2014年10月5日于三河口

# 符号说明

符 号	意 义	讲 座
A	振幅 顶角	3、9、16 21
A	安培(电流强度单位)	3、14
AC	交流电	7
A/D	模拟/数字转换	24
B	磁感应强度	18、19
B	电池	15
C	电容	10、13、15
C	库仑	18
CH1, CH2	通道 1, 通道 2	6、7、8、13
CCD	电荷耦合元件	4、14、16、23、24
COM	通用	11
COMS	互补金属氧化物半导体(用作芯片)	14、15
$C_p$	定压摩尔热容	8
$C_v$	定容摩尔热容	8
D	占空比 长度 直径	14 16 22
DC	直流电	7
E	金属弹性模量 电场强度 能量	4 8 24
$\mathcal{E}$	电动势	11、12、13、14、17
F	力 焦点	4、6、7、8、10、15 20
G	万有引力常量 格林函数	5 23
G	表头;检流计	11、15
GND	接地	7
H	水平方向	23
H <sup>+</sup>	氢离子	15
Hz	赫兹(频率的单位)	8

续表

符 号	意 义	讲 座
$I$	电流强度 强度	3,11,12,13,14,15,18 23
$J$	转动惯量 贝塞尔函数	5,6 23
$K$ $K_r$	系数;电平 开关 比率比	4,11 15,17,18 15
$L$ LED	长度 自感系数 熔化热 角动量 发光二极管	4,6 10,13 17 24 14,20,21,24
$M$ Matlab Multimedia ToolBook	镜子 质量;力矩 矩阵实验室 多媒体著作工具	4,16 5,6,10 19,23 3
$N$ NTC	匝数 负温度系数	19 14
$O$ $OH^-$ Origin	坐标原点 氢氧根 作图计算软件	5,6,7,8 15 3
$P$ PTC	点 功率 概率 正温度系数	3 11 16 14
$Q$	电量 热量	18 17
$R$ Re	地球半径;半径 曲率半径 电阻 反射系数 实部	5,19,22 21 2,10,11,12,13,14,15,16,17 16 8,23
$S$	求和 面积 电偏转灵敏度;灵敏度	2 4,7,15,23 8,14,15,16
$T$	热力学温标( $= 273.15 + t$ );温度 时间;周期 张力 透射系数	2,3,8,15,17 4,5,6,7,9,18 10 16

续表

符 号	意 义	讲 座
$U$	不确定度 电压;电势 复振幅	2,4,5,22 7,13,15,16 23
$U_r$	相对不确定度	2
USB	通用串行总线	7
$V$	电压 体积	3,7,11,12,14,18 17
V	伏特(电压的单位) 竖直方向	7,11,13,14,18 23
W	瓦(功率的单位)	12
$X$	$X$ 方向	7
$Y$	$Y$ 方向	7
$Z$	阻抗	13,15
$a$	真值;数学期望 加速度 斜率 准确度 透光部分宽度	2 6,7,8 10 15 23
atm	大气压	8
$b$	截距 黏滞阻力系数 长度 宽度 固定不确定度项系数 不透光部分宽度	3,10 6 4 18 15 23
b	基极	11
$c$	比热容	17
c	集电极	11
cm	厘米	2,18,20
$d$	直径;距离;厚度 光栅常量	4,5,7,10,15,18,23 16
d	微分符号	6,8,10,13,18,19,20
dB	分贝	11
$e$	误差;最小分度 不确定度 薄膜厚度 电子电量 距离 厚度	2 2 21 7,14,24 20 22
e	自然对数的底 发射极	6,10,13,15,23 11
eV	电子伏特	24

续表

符 号	意 义	讲 座
$f$	频率 力;洛伦兹力 焦距 函数	4、7、8、13 10、18 19 附录
$g$ $g$	重力加速度 克	5、6、10、15 9、10
$h$ $\frac{h}{2\pi}$	厚度 普朗克常量 约化普朗克常量	4 24 24
$i$ $i$	电流 入射角 虚数单位	13 21 23
$k$ $kg$ $k\Omega$	电表精度的等级 斜率 劲度系数 波数 序号 千克 千欧	2 3 6、10 8 16、22 12 11、12、14
$l$ $lim$ $ln$ $lx$	摆长;长度 极限 自然对数符号 勒克斯(照明单位)	5、10、16 2 3、6 14
$m$ $m$ $mA$ $min$ $mL$ $mH$ $mm$ $ms$ $mW$	质量 米 毫安 分(时间单位) 毫升 毫亨 毫米 毫秒 毫瓦	4、5、6、7、8、10、15、17 5 2、3、11、12、14、18 17 17 13 1、2、7、8、10、20 14 11、23
$n$ $ns$ $n$ $n$ $nm$	单位长度上的匝数 载流子浓度 折射率 次数 光程 法向 $n$ 型半导体 纳米	18 18 19、21、23 2 19 23 14、18 23、24
$o$	坐标原点	



续表

符 号	意 义	讲 座
$p$ $p$	压强 p 型半导体	8、 14、18
$q$	电量 热量	7、10、13、18 17
$r$  $r$	相关系数 内阻 半径 距离;传播距离 矢径	3 11、15 19、21、24 23 16、19、23
$s$	样本不确定度;标准差的无偏估计 距离	2、3、13 20
$t$	时间 温度	5、6、13 16、17
$u$	不确定度 电压 速度 物距	2、7 8、13 13 20
$v$	速度 像距	4、6、7、8、9、18、24 20
$\alpha$	线胀系数 角度	16 21
$\beta$	角加速度	5
$\gamma$	定压摩尔热容与定容摩尔热容之比 折射角	8 21
$\delta$  $\delta_{\min}$	偏差 残差 偏向角 最小偏向角	2 3 21 21
$\epsilon$	精度 真空中的电容率(介电常数) $8.85 \times 10^{-12}$ F/m	2 24
$\varphi$	初相位;相位 衍射角;角度	5、6、8、9、13 16、19、21、23
$\nu$	频率	24
$\pi$	圆周率;半波相位 $\pi$ 形框	4、5、6、8、9、10、13 10
$\theta$	角度 电动势	4、5、6、10、16、21 3
$\rho$	体密度;密度	4、8、10、17

续表

符 号	意 义	讲 座
$\lambda$	波长	8、16、21、22、23、24
$\sigma$ $\sigma^2$	标准差 方差	3 2
$\tau$	表面张力系数 温度	10 17
$\omega$	圆频率	5、6、8、9、13、15、23
$\epsilon_0$	真空介电常数	24
$\mu$ $\mu_0$ $\mu\text{A}$ $\mu\text{F}$ $\mu\text{m}$	线密度 迁移率 真空磁导率 微安 微法 微米	9 14、19 18 11、12、14 13 6
$\partial$	偏微分	8、23
$\nabla$ $\nabla^2$	梯度 拉普拉斯算子	23 23
$\sum$	求和	3
$\Phi$	磁通量	13
$\Delta$ $\triangle$ $\Delta$ $\Delta L; \Delta l$ $\Delta t$ $\Delta V$ $\Delta\varphi$	误差, 绝对误差 三角形 拉普拉斯算子 长度伸长量 时间变化量 体积的变化 角度的变化	2 5 23 4、6 6 17 8
$\Omega$	欧姆(电阻的单位)	11、12、14、15
° ' "	度、分、秒(角度); 分、秒(时间)	1、5
$\sqrt{\quad}$	根号; 平方根	1、2、3、4、5、6、8、9、10、12、13、16
$\langle \rangle$	求平均	16
$^{\circ}\text{C}$	度(温度的单位)	8、15、16

# 目 录

序 .....	( i )
符号说明 .....	( vii )
第 1 讲 实验、测量与有效数字 .....	( 1 )
1.1 实践与实验 .....	( 1 )
1.2 测量与有效数字 .....	( 1 )
1.3 有效数字的运算 .....	( 3 )
第 2 讲 误差与不确定度 .....	( 4 )
2.1 误差 .....	( 4 )
2.2 不确定度 .....	( 4 )
2.3 系统误差与随机误差 .....	( 5 )
2.4 不确定度的估计方法 .....	( 5 )
2.5 实验结果的表述 .....	( 8 )
第 3 讲 常用实验数据的处理方法 .....	( 10 )
3.1 列表法 .....	( 10 )
3.2 作图法 .....	( 11 )
3.3 逐差法 .....	( 11 )
* 3.4 最小二乘法 .....	( 12 )
3.5 计算机数据处理 .....	( 13 )
第 4 讲 金属弹性模量的测量 .....	( 21 )
实验联想 1 基于 CCD 拉伸法测定金属弹性模量 .....	( 23 )
实验联想 2 基于弯曲共振法测定材料弹性模量 <sup>[5]</sup> .....	( 24 )
第 5 讲 用单摆测量重力加速度 .....	( 28 )
* 实验联想 1 复摆 <sup>[7]</sup> .....	( 29 )
实验联想 2 利用秒表测量地球半径 .....	( 30 )
第 6 讲 气轨上研究物体的运动 .....	( 31 )
实验联想 1 气垫导轨上测量弹簧劲度系数 .....	( 32 )
实验联想 2 测量弹簧的有效质量 .....	( 33 )
实验联想 3 验证刚体的角动量守恒定律 .....	( 34 )
第 7 讲 示波器的使用 .....	( 36 )
实验联想 数字示波器 .....	( 43 )

第 8 讲 声速的测定 .....	( 44 )
实验联想 1 利用利萨如图形测量声速 <sup>[28]</sup> .....	( 48 )
实验联想 2 驻波法测声速中次极大值的理论分析 .....	( 49 )
第 9 讲 弦驻波实验 .....	( 51 )
实验联想 1 圆驻波 <sup>[32]</sup> .....	( 53 )
实验联想 2 铝棒的声音实验器 .....	( 54 )
第 10 讲 用焦利秤测定液体的表面张力 .....	( 55 )
实验联想 1 一种改进的焦利秤 .....	( 58 )
实验联想 2 焦利秤的应用 <sup>[36-37]</sup> .....	( 59 )
第 11 讲 多用表的使用 .....	( 60 )
实验联想 1 多用表上的 dB 挡 <sup>[36]</sup> .....	( 64 )
实验联想 2 数字多用表 .....	( 65 )
第 12 讲 电表的改装与校准 .....	( 68 )
实验联想 1 电阻与额定功率 .....	( 71 )
实验联想 2 电阻与允许测量误差 .....	( 71 )
实验联想 3 从色环读出电阻阻值 .....	( 72 )
第 13 讲 黑匣子实验 .....	( 73 )
实验联想 1 LC 振荡电路及其应用 .....	( 84 )
实验联想 2 奥林匹克物理竞赛黑匣子实验分析 <sup>[46]</sup> .....	( 84 )
第 14 讲 线性与非线性电阻伏安特性曲线的测量 .....	( 88 )
实验联想 1 非线性电阻与泰勒展开 <sup>[48]</sup> .....	( 92 )
实验联想 2 发光二极管 .....	( 92 )
实验联想 3 热敏电阻 .....	( 93 )
实验联想 4 光敏电阻 .....	( 94 )
实验联想 5 压敏电阻 .....	( 99 )
第 15 讲 用惠斯通电桥测量电阻 .....	( 100 )
实验联想 1 QJ23 型携带式直流单电桥 .....	( 102 )
实验联想 2 惠斯通电桥的应用 .....	( 106 )
实验联想 3 温度传感器 .....	( 107 )
实验联想 4 湿度传感器 .....	( 108 )
第 16 讲 固体线胀系数的测定 .....	( 110 )
实验联想 1 多光束干涉法测固体线胀系数 <sup>[70]</sup> .....	( 111 )
实验联想 2 固体线胀系数的理论计算 .....	( 114 )
第 17 讲 液体比热容的测定 .....	( 117 )
实验联想 1 用冷却法测定液体比热容 <sup>[74]</sup> .....	( 118 )
实验联想 2 冰的熔化热 .....	( 119 )

第 18 讲 用霍尔效应测量磁场 .....	(121)
实验联想 1 箱式电位差计 .....	(127)
实验联想 2 霍尔效应的应用与发展 .....	(128)
第 19 讲 亥姆霍兹线圈轴线上磁场分布的研究 .....	(130)
* 实验联想 1 单匝通电线圈空间磁场分布 .....	(132)
* 实验联想 2 亥姆霍兹线圈空间磁场分布 .....	(134)
第 20 讲 薄透镜焦距的测定 .....	(139)
实验联想 1 薄透镜成像实验改进 .....	(146)
实验联想 2 望远镜 .....	(148)
实验联想 3 显微镜 .....	(150)
第 21 讲 用最小偏向角法测定棱镜片折射率 .....	(152)
实验联想 1 垂直一边法测棱镜片折射率 <sup>[87]</sup> .....	(158)
实验联想 2 掠入射法测棱镜片折射率 .....	(159)
实验联想 3 测液体折射率 .....	(160)
实验联想 4 偏向角与入射角的关系 .....	(161)
第 22 讲 等厚干涉——牛顿环实验 .....	(163)
实验联想 杨氏双缝干涉 .....	(166)
第 23 讲 夫琅禾费单缝衍射的研究 .....	(168)
实验联想 1 高斯光束照射下的单缝夫琅禾费衍射 <sup>[91]</sup> .....	(176)
实验联想 2 用分光计测定光栅常量 .....	(179)
实验联想 3 基于 CCD 与衍射光栅测量透明材料的折射率 <sup>[92]</sup> .....	(180)
第 24 讲 观测氢原子光谱 .....	(182)
实验联想 1 用棱镜摄谱仪测量氢原子光谱 .....	(186)
实验联想 2 用分光计观察氢原子光谱 .....	(186)
附录 正态分布函数数据表 .....	(189)
参考文献 .....	(191)

# 第 1 讲 实验、测量与有效数字

## 1.1 实践与实验

唯物主义思想家、教育家荀子在《荀子·解蔽》中写道：“凡以知，人之性也；可以知，物之理也。”意思是：人有能力去认识世界，世界是可以为人所认识的。Forster 的名言“Nature is a big book that does not hide itself. We can know it so long as we read it.”<sup>[1]</sup>意思是：自然界是一本不隐藏自己的大书，只要我们去读它，就可以认识它。马克思的辩证唯物主义思想，把实践看作人类有目的地改造客观世界的物质活动的整体，实践是认识的基础。无数事实证明认识来源于实践，包括电子计算机、原子弹、氢弹、宇宙飞船、人造卫星、激光器等现代科学技术成就，都是前所未有的，过去被认为不可理解、不可思议的事物，现在人们一一认识了。马克思主义指出只有实践才是检验真理的唯一标准，从实践中获得认识，将实践中获得的认识上升为理论，理论进一步指导实践，实现第二次飞跃，意义更加伟大。

本书力求引导同学们努力去探索自然界的奥秘，坚持不懈地钻研各个问题，系统地认识物质世界规律，改造世界观。下面还是从实验基本理论开始介绍。

## 1.2 测量与有效数字

人们认识自然规律是从大量的实践活动开始的。在物理上描述任何一个量，譬如长度、质量、时间，都需要一个数字和一个单位。要获得一个数字需要将待测的量与标准量进行比较，得到标准量的倍数的过程就是测量。这个倍数在物理实验中由准确数与一位估读数构成，这样测量得到的数字称为有效数字。

如图 1.1 所示，利用厘米刻度的尺子测得木棒长度由准确数 6 和估读数 7 构成，有效数字为 6.7；如图 1.2 所示，同样的木棒，利用毫米刻度的尺测得准确数为“6.7”，十等分估读得到“4”，故有效数字为 6.74。



图 1.1 用厘米刻度的尺测量

需要说明的是,测量仪器决定着有效数字的位数。有效数字反映出测量仪器的精度。



图 1.2 用毫米刻度的尺测量

### 1.2.1 游标卡尺与精度

如图 1.3 所示,图下方的游标有 50 等份,其长度与上方主尺的 49 格相同,可见,游标辅尺上 1 格的长度为  $0.98\text{ mm}$ ,主尺上 1 格与游标辅尺上 1 格相差  $1\text{ mm}/50 = 0.02\text{ mm}$ ,因此,这样的游标卡尺精度为  $0.02\text{ mm}$ ,游标上的“0”对应主尺上  $49\sim 50\text{ mm}$ ,游标上第“5”格与主尺对齐,测量得到的有效数字为  $49.10\text{ mm}$ ,是  $0.02\text{ mm}$  的倍数。

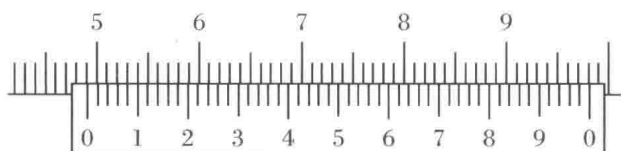


图 1.3 用游标卡尺测量

### 1.2.2 千分卡的原理

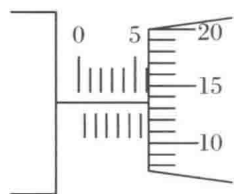


图 1.4 用千分卡测量

如图 1.4 所示,主尺上“0~5”之间为  $5\text{ mm}$ ,上下标尺上的刻度间隔都是  $1\text{ mm}$ ,但是相邻的上下刻度相距  $0.5\text{ mm}$ ,右边螺旋筒上一圈将主尺上  $0.5\text{ mm}$  长度分成 50 格,每 1 格为  $0.5\text{ mm}/50 = 0.01\text{ mm}$ 。由于按十等分估读 1 位,其精度为  $0.001\text{ mm}$ ,故称千分卡尺,教材上称螺旋测微器。如图 1.4 所示,主尺上“6 mm”刻度线已出现,螺旋筒上指示“13~14”之间,估读“5”,于是测量得到的有效数字为  $6.135\text{ mm}$ 。

### 1.2.3 角游标

角游标与线游标原理相同,例如分光计实验仪器,如图 1.5 所示,在下面的主尺上  $10^\circ$  分为 20 小格,每一小格为  $0.5^\circ$ ,即  $30'$  ( $1^\circ = 60'$ ),上面的游标分为 30 等份,其角度与主尺的 29 小格相等,即主尺一格与辅尺一格相差  $1'$ 。由此可见,这样的分光计的精度为  $1'$ ,每次测量的有效数字精确到  $1'$ 。

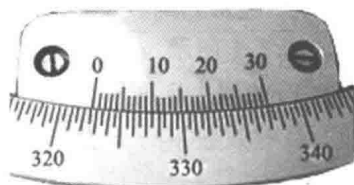


图 1.5 角游标

## 1.3 有效数字的运算

在实验中,测量一个物体的半径,通常先测量直径,除以2后得半径;测量一个物体的体积,通常也需要进行计算而得到,这种测量方式称为间接测量。因此,测量得到的有效数字往往需要进行运算。

有效数字运算法则如下。

### (1) 加减法

有效数字进行加减,小数点先对齐,然后进行加减,其原则为:准确数字与准确数字相加减,得准确数字;准确数字与可疑(即估读)数字相加减,得可疑数字;可疑数字与可疑数字相加减,得可疑数字。

例如  $98.765 + 2.3$ ,列竖式如图 1.6(a)所示,得到 101.065,按照有效数字的定义,有且仅有 1 位可疑数字,故所得结果为 101.1;同样,“ $98.75 - 2.3$ ”显然等于 96.45。本书采用“四舍六入五凑偶”法则,减法得到的结果为 96.4,最后 1 位为可疑数字。解释如下,如果结果写成 96.5,取半后又进位得到 48.3,再取半后又进位,则为 24.2;而 96.45 直接除以 4 后得 24.1125,保留 1 位小数得到 24.1,与“四舍六入五凑偶”法则得到的结果完全一样。

$$\begin{array}{r} 98.76\bar{5} \\ + 2.\bar{3} \\ \hline 101.06\bar{5} \\ \text{(a) 加法} \end{array} \qquad \begin{array}{r} 98.\bar{7}5 \\ - 2.\bar{3} \\ \hline 96.4\bar{5} \\ \text{(b) 减法} \end{array}$$

图 1.6 有效数字加减运算

### (2) 乘除法

有效数字相乘除,看每个因子中位数最少的位数,最后结果保留位数最少的位数。例如 3 位有效数字与 4 位有效数字相乘除,最后结果保留 3 位。例如“ $1\ 501 \times 401$ ”,得到 601 901,由于最后 4 位都是可疑数字,故最后结果为  $6.02 \times 10^5$ 。例如“ $77.6 \div 38$ ”,得到 2.04,后 2 位为可疑数字,故最后结果为 2.0,因为除数“38”只有 2 位有效数字。如图 1.7 所示。

$$\begin{array}{r} 150\bar{1} \\ \times 40\bar{1} \\ \hline 150\bar{1} \\ 000\bar{0} \\ 600\bar{4} \\ \hline 60190\bar{1} \\ \text{(a) 乘法} \end{array} \qquad \begin{array}{r} 2.0\bar{4} \\ 38 \overline{)77.6} \\ \underline{76} \\ 1.60 \\ \underline{1.52} \\ 0.08 \\ \text{(b) 除法} \end{array}$$

图 1.7 有效数字乘除运算



## 第 2 讲 误差与不确定度

### 2.1 误差

任何物理量都有真值,用  $a$  表示,在 JJF 1001 — 1998 标准中,定义量的真值为“与给定的特定量的定义一致的值”,包括 3 个方面的特点:(1) 量的真值只有通过完善的测量才有可能获得;(2) 真值按其本性是不确定的;(3) 与给定的特定量的定义一致的值不一定只有一个<sup>[2]</sup>。

测量值与真值之差称为误差。真值可以认为是无穷次测量值的平均值,即

$$a = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{x_1 + x_2 + \cdots + x_n}{n} \quad (2.1)$$

式中,  $x_i$  为某物理量的第  $i$  次测量值,误差(严格地说是绝对误差)为

$$e_i = |x_i - a| \quad (2.2)$$

由于测量次数不可能无穷多次,因此真值是测量不出来的,故误差是一个理想的概念。

### 2.2 不确定度

在物理实验中,由于测量次数有限,故通常用多次测量值的平均值作为该物理量的最佳估计值<sup>[3]</sup>:

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \cdots + x_n}{n} \quad (2.3)$$

因此,不确定度定义为测量值与最佳估计值之差,即

$$U_i = |x_i - \bar{x}| \quad (2.4)$$

式(2.4)也称为绝对不确定度,相对不确定度定义为

$$U_r = \frac{|x_i - \bar{x}|}{\bar{x}} \times 100\% \quad (2.5)$$

\* 算术平均值为最佳估计值。

当测量次数  $n$  为有限次,测量值分别为  $x_1, x_2, \cdots, x_n$  时,算术平均值为  $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$ 。

令单次测量值  $x_i$  与最佳估计值  $X$  的差的平方和为  $S = \sum_{i=1}^n (x_i - X)^2$ ,只有当  $S$  对  $X$  的一阶导数为零,二阶导数大于零时,  $S$  取极小值。即