

高等医药院校教材
供临床、药学、口腔、护理等专业用

医学实验技术

主编 曹 凯



人民卫生出版社

PEOPLE'S MEDICAL PUBLISHING HOUSE

高等医药院校教材
供临床、药学、口腔、护理等专业用

医学实验技术

主 编 曹 凯

副主编 李玉红 张 雷 周晓慧 唐海峰 胡亚涛

编 者 (以姓氏笔画为序)

王文勇	王丽娜	王春艳	毛淑芳	方艳辉	石建芹
刘东海	刘丽艳	刘金霞	刘振虹	刘朝晖	齐洁敏
杜雯英	杜晓鹃	李砚超	李素婷	张凤英	陈海辉
郑纪宁	徐大维	高玉峰	程露阳		

人民卫生出版社

图书在版编目(CIP)数据

医学实验技术 / 曹凯主编. —北京: 人民卫生出版社,
2015

ISBN 978-7-117-21227-4

I. ①医… II. ①曹… III. ①实验医学—医学院
校—教材 IV. ①R-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 205997 号

人卫社官网	www.pmph.com	出版物查询, 在线购书
人卫医学网	www.ipmph.com	医学考试辅导, 医学数 据库服务, 医学教育资 源, 大众健康资讯

版权所有, 侵权必究!

医学实验技术

主 编: 曹 凯

出版发行: 人民卫生出版社(中继线 010-59780011)

地 址: 北京市朝阳区潘家园南里 19 号

邮 编: 100021

E - mail: pmph@pmph.com

购书热线: 010-59787592 010-59787584 010-65264830

印 刷: 北京机工印刷厂

经 销: 新华书店

开 本: 850×1168 1/16 印张: 24 插页: 12

字 数: 710 千字

版 次: 2015 年 10 月第 1 版 2015 年 10 月第 1 版第 1 次印刷

标准书号: ISBN 978-7-117-21227-4/R · 21228

定 价: 65.00 元

打击盗版举报电话: 010-59787491 E-mail: WQ@pmph.com

(凡属印装质量问题请与本社市场营销中心联系退换)

前 言

随着医学科学的发展,以加强学生素质教育、提高人才培养质量为目标的教育教学改革不断深入,实验教学在高等医学教育中的重要作用日益突显。实验教学是高等医学教育的重要组成,是培养医学生实践能力的重要环节。传统的医学实验教学模式存在着内容分散,与新技术、新方法脱节,不利于学生能力培养等诸多弊端,使得学生缺乏对医学知识的整体性把握,学科间也缺乏内在的交叉融合。

本书包括公共基础和医学基础实验项目两大部分,涉及实验项目 151 项,适合临床医学相关专业学生学习。教材选择了一些较为先进的新技术和方法,减少了单纯的验证性实验项目,增加了综合性、设计性实验项目和跨学科实验项目,体现了学科知识间的联系和衔接,以期提高学生综合应用、分析和解决问题的能力。

在编写和修订过程中,本教材得到了多位专家教授的大力支持,并承担其中主要章节的编写工作,在此向为本书出版付出辛勤努力的所有人员表示衷心感谢。同时欢迎广大读者批评指正,不吝赐教。

曹 凯

2015 年 7 月

目 录

第一章 物理学	1
实验一 基本测量	9
实验二 液体黏度的测定	16
实验三 验证刚体转动的基本定律	21
实验四 拉脱法测液体的表面张力系数	24
实验五 压力传感器测量脉搏	26
实验六 超声诊断仪的原理和使用	28
实验七 静电场的描绘	34
实验八 万用电表原理和使用	39
实验九 示波器及其应用	44
实验十 光波波长的测定	54
实验十一 用旋光计(偏振计)测定糖溶液的浓度	57
实验十二 核磁共振	60
实验十三 心电图机的原理和使用	66
实验十四 演示光的干涉、衍射等现象	70
实验十五 照相技术初步	72
实验十六 设计实验	75
第二章 化学	77
实验一 半自动电光分析天平的使用	81
实验二 盐酸溶液浓度的标定(酸碱滴定法)	86
实验三 醋酸电离常数的测定及pH计的使用	87
实验四 缓冲溶液的配制及pH的测定	90
实验五 水质硬度的测定(配位滴定法)	91
实验六 双氧水中 H_2O_2 含量的测定(高锰酸钾法)	93
实验七 分光光度法测定高锰酸钾溶液中 KMnO_4 的含量	95
实验八 凝固点降低法测萘的相对分子质量	99
实验九 常压蒸馏及沸点测定	101
实验十 熔点测定	103
实验十一 旋光度法测定葡萄糖溶液的浓度	105
实验十二 折射率的测定	108
实验十三 柱层析	110
实验十四 氨基酸的纸色谱	112

实验十五 薄层层析	115
实验十六 乙酰水杨酸的制备	117
实验十七 茶叶中咖啡因的提取	120
实验十八 模型作业	122
第三章 形态学	126
第一节 组织学与胚胎学	126
实验一 绪论	127
实验二 上皮组织	131
实验三 固有结缔组织	132
实验四 软骨和骨	133
实验五 血液与肌组织	135
实验六 神经组织	136
实验七 循环系统	138
实验八 免疫系统	140
实验九 消化系统——消化管	141
实验十 消化系统——消化腺	144
实验十一 呼吸系统	146
实验十二 皮肤	147
实验十三 内分泌系统	149
实验十四 泌尿系统	150
实验十五 男性生殖系统	152
实验十六 女性生殖系统	153
实验十七 感觉器官	155
第二节 病理学	157
实验一 细胞与组织损伤	158
实验二 修复与适应	159
实验三 局部血液循环障碍	160
实验四 炎症	161
实验五 肿瘤	162
实验六 心血管系统疾病	164
实验七 呼吸系统疾病	165
实验八 消化系统疾病	166
实验九 泌尿系统疾病	167
实验十 生殖系统疾病	168
实验十一 内分泌系统疾病	169
实验十二 神经系统疾病	170
实验十三 传染病	170
第四章 分子生物学	172
第一节 生物化学	172
实验一 蛋白质的沉淀与凝固	176
实验二 蛋白质两性解离和等电点测定	179

实验三	双缩脲法测定蛋白质含量	180
实验四	考马斯亮蓝 G-250 染色法测定蛋白质含量	181
实验五	紫外分光光度法测定蛋白质含量	182
实验六	凝胶过滤层析分离血红蛋白与硫酸铜	183
实验七	血清脂蛋白琼脂糖电泳	184
实验八	血清蛋白醋酸纤维素薄膜电泳	185
实验九	血清蛋白聚丙烯酰胺凝胶电泳	187
实验十	影响酶促反应的因素	189
实验十一	碱性磷酸酶米氏常数的测定	191
实验十二	琥珀酸脱氢酶活性的抑制	194
实验十三	食物中维生素 C 的提取和定量	195
实验十四	激素对血糖浓度的影响	196
实验十五	血清丙氨酸转氨酶活性测定(赖氏法)	198
实验十六	血清 γ -球蛋白的分离、纯化及鉴定	199
实验十七	动物肝组织中 DNA 的提取与含量测定	203
实验十八	聚合酶链反应(PCR)扩增目的基因及电泳鉴定	207
实验十九	质粒的提取及酶切鉴定	208
第二节	细胞生物学	210
实验一	光学显微镜的构造和使用方法	210
实验二	细胞结构与细胞的显微测量	213
实验三	细胞的生理活动	216
实验四	细胞的有丝分裂	217
实验五	线粒体的活体染色	219
实验六	细胞融合	221
实验七	Feulgen 反应	222
实验八	细胞组分的化学反应	223
实验九	细胞培养	225
实验十	细胞活力检测	227
实验十一	生殖细胞的减数分裂	228
实验十二	X 染色质标本的制作与观察	231
实验十三	DNA 的提取与鉴定	233
实验十四	微核实验	234
实验十五	人体外周血染色体标本的制作	235
实验十六	人类某些遗传性状的观察	237
实验十七	人类皮肤纹理观察	240
附录	试剂浓度的表示法及其计算	244
第五章	病原生物学	248
第一节	医学寄生虫学	248
实验一	似蚓蛔线虫 (<i>Ascaris lumbricoides</i>) (蛔虫) 蠕形住肠线虫 (<i>Enterobius vermicularis</i>) (蛲虫)	249
实验二	十二指肠钩口线虫 (<i>Ancylostoma duodenale</i>) 美洲板口线虫 (<i>Necator americanus</i>) 毛首鞭形线虫 (<i>Trichuris trichiura</i>)	251

实验三	班氏吴策线虫 (<i>Wuchereria bancrofti</i>) 马来布鲁线虫 (<i>Brugia malayi</i>) 旋毛形线虫 (<i>Trichinella spiralis</i>)	253
实验四	华支睾吸虫 (<i>Clonorchis sinensis</i>) 卫氏并殖吸虫 (<i>Paragonimus westermani</i>)	254
实验五	日本血吸虫 (<i>Schistosoma japonicum</i>) (血吸虫) 布氏姜片吸虫 (<i>Fasciolopsis buski</i>) (姜片虫)	256
实验六	链状带绦虫 (<i>Taenia solium</i>) 肥胖带绦虫 (<i>Taenia saginata</i>)	258
实验七	细粒棘球绦虫 (<i>Echinococcus granulosus</i>) 微小膜壳绦虫 (<i>Hymenolepis nana</i>)	260
实验八	溶组织内阿米巴 (<i>Entamoeba histolytica</i>) 蓝氏贾第鞭毛虫 (<i>Giardia lamblia</i>)	261
实验九	杜氏利什曼原虫 (<i>Leishmania donovani</i>) 阴道毛滴虫 (<i>Trichomonas vaginalis</i>)	262
实验十	疟原虫 (<i>Plasmodium</i>)	264
实验十一	肠道寄生虫调查 (粪便检查)	266
实验十二	多种抗滴虫药物对阴道毛滴虫增殖活性的影响	267
第二节	医学微生物学	269
实验一	显微镜油镜使用及细菌形态观察	269
实验二	医学细菌学总论“四步八项”综合性实验	271
实验三	抗酸染色法	281
实验四	病原性球菌未知标本 (脓汁) 的检查	282
实验五	粪便标本中致病性肠道杆菌的分离与鉴定	285
实验六	肥达试验	290
实验七	霍乱弧菌、破伤风梭菌、白喉棒状杆菌、炭疽芽胞杆菌的形态观察	291
实验八	螺旋体	292
实验九	真菌	293
实验十	鲍曼不动杆菌感染动物模型的制备和致病机制研究	294
实验十一	流感病毒的鸡胚接种法培养和血凝抑制实验	296
第三节	医学免疫学	298
实验一	直接凝集试验——ABO 血型鉴定	298
实验二	沉淀反应——双向琼脂扩散	300
实验三	沉淀反应——单向琼脂扩散	301
实验四	补体溶血试验	302
实验五	斑点免疫层析试验	303
实验六	酶联免疫吸附试验 (ELISA) - 乙肝表面抗原 (HBsAg) 检测	305
实验七	T 细胞计数	307
实验八	免疫印迹技术	309
实验九	免疫血清制备	311
实验十	细胞凋亡检测	312
第六章	预防医学	314
实验一	计量资料的统计分析	314
实验二	计数资料的统计分析	319
实验三	非参数检验	320
实验四	统计图、统计表、直线相关与直线回归	322
实验五	SPSS 软件应用	324
实验六	错误辨析与案例讨论	325

实验七 疾病的分布.....	327
实验八 健康相关问题的现况调查.....	330
实验九 吸烟与肺癌关系的病例对照研究.....	332
实验十 临床试验.....	334
实验十一 不明原因脑炎的流行病学研究.....	336
实验十二 诊断试验与筛检试验的评价.....	338
实验十三 环境接触史采集.....	340
实验十四 儿童铅中毒案例讨论.....	342
实验十五 营养相关疾病案例讨论.....	345
实验十六 食谱计算和食谱编制.....	347
实验十七 食物中毒案例讨论.....	349
实验十八 健康危险度评估与健康维护计划.....	351

第一章 物理学

物理学研究的规律是自然界中最基本和最普遍意义的规律。因为物理现象存在于一切自然现象之中,与一切自然现象存在着密不可分的内在联系。例如,化学反应中包含有电子的得失和分子运动以及热和电的现象。人体中的神经活动和肌肉活动等都包含着一系列电变化过程等。一切自然现象,包括有生命的与无生命的在内,都毫无例外地受到热力学定律、万有引力定律以及其他物理定律的约束。物理现象的普遍性,使得物理学基本知识成为研究任何科学技术(包括医学在内)所不可缺少的基础。

一、医用物理实验课的目的和任务

物理学是以实验为基础的一门科学。它是研究物质运动最基本形式和最普遍规律,并将这些规律应用于生产实践的科学。

医用物理学是一门发展很快的边缘学科,它研究的内容和方法是多方面、多层次的。医用物理学是用物理学的规律来研究和解释一些生物的和医学现象的科学。

(一) 医用物理实验课的目的

医用物理实验是医用物理学的研究和发展的的重要手段,因为一切理论和真知都是从实践中发源的。医用物理实验是培养医学专业学生总结规律能力、发现问题和解决问题能力、动手能力以及创造性思维能力的-一个重要方法,对于医学专业后续课是十分重要的,并可为医学专业学生今后开展科研和专业发展提供基本的、有效的方法。通过物理实验和观察,使学生深入掌握物理现象的规律性,同时也检验物理理论正确性,使这门科学更完整更严密。所以,我们必须正确认识实验课在整个学习过程中的地位和作用,不能把实验课看成是对理论知识的验证,或把实验课视为是理论课的附属,实验课对学生的能力培养是理论课所无法替代的。目前,国内理工科院校已将物理实验课从物理理论课中分离出来,作为一门独立的学科进行教学,学好物理实验课对医学生来说是十分重要的。

(二) 医用物理实验课的任务

1. 学习方法 熟悉卡尺、分尺、停表、温度计、伏特计、万用表、示波器、信号发生器、常用电源等仪器的原理和使用方法,学习部分医疗仪器的性能测试方法和使用方法,学习实验数据的记录和处理、实验结果的误差分析方法等。

2. 培养技能 通过实验,培养学生科学认真的工作作风,严肃认真的工作态度,培养实验技能和科研能力,要求在实验过程中善于发现问题,提出问题,在教师的指导下,培养解决疑难问题能力。

3. 认识规律 我们所做的实验多数是重复前人的实验,以巩固和加深对已学物理现象和物理规律的认识为主,同时要求学生拓展思路,善于把物理规律与医学知识相联系,并使所学知识得到发展和提高。也可以对所开实验内容提出改进意见,对仪器进行革新等。

二、物理实验基础知识

(一) 物理量的测量及误差分类

1. 测量及分类 物理实验不仅对物理变化过程要做定性的观察,而且还要对某些物理量进行定

量的测量。例如,长度、质量、时间、温度、电流等。测量某一物理量,实际上就是用—个确定为标准单位的物理量和待测的未知量进行比较,所得的倍数就是该未知量的测量值。

测量方法可分为直接测量和间接测量。直接测量是将待测量与标准量作比较而直接得出结果的测量。例如,用米尺测量长度、用秒表测量时间等,就是属于这一类,都是用基本测量仪器就能直接测出该量的结果。间接测量依靠直接测量的结果,再经过物理公式的计算,才能得出最后的结果。例如,要测量圆柱体的体积,首先要测量其直径和高度,然后再用公式计算才能得出体积的数值。大多数测量都是属于这一类。

2. 测量中的误差及分类 测量的目的就是力图得到真值。所谓真值,就是反映物质自身各种特性的物理量所具有的客观真实数值。严格来讲,由于仪器精密度、测量方法、测量程序、实验环境、实验者的观察力等都不可能完美无缺,尽管对同一物理量经过多次测量,所得的结果也只能达到一定限度的准确程度,因而不能认为测得的结果就是它的真值。真值是不可能准确测得的。通常将在相同条件下进行多次重复测量的算术平均值称为测量的最佳值或近真值,当测量次数无限增加时,算术平均值将无限接近于真值。然而我们不能对同一物理量进行无限多次测量,因而常用有限次测量的算术平均值作为真值。

物理量的测量值与该量的客观真实值比较所得到的差值称为误差。用数学式子可表示为

$$\delta = N - Z \quad (0-1)$$

式中, δ ——误差; N ——测量值; Z ——真值。

由于测量值不能与真值完全相同,所以误差总是存在的。根据误差的性质及产生原因,可分为系统误差、偶然误差和过失误差。

(1) 系统误差:又称恒定误差,是指在测量中由未被发觉或未确认的因素所引起的误差。例如,仪器不准确、周围环境(温度、湿度、气压等)变化的影响、个人习惯与偏向(读数总是偏高或偏低等)、理论和测量方法本身不严密等原因所造成的误差。由于这些因素影响,测得的数值总是朝一个方向偏离,或总是偏大,或总是偏小。其特征是偏离的确定性,增加测量次数也不能有所改善。但如果根据其产生原因分别加以校正,如对仪器修正、改进测量方法、对影响实验的有关因素加以周密考虑等,则系统误差是能尽量减小的。

(2) 偶然误差:亦称随机误差,是由一些无法控制、纯属偶然的因素所引起的误差。其特征是时而偏大,时而偏小,时正时负,方向不定,其发生纯属偶然,受概率支配。减少偶然误差的方法是进行多次重复测量。

(3) 过失误差:这是人为的误差,如实验者粗心大意、实验方法不当、使用仪器不准确、读错数据等。因此,实验者只要有严肃认真的态度和一丝不苟的科学作风,过失误差是可以避免的。

(二) 直接测量误差的计算和测量结果的表示

1. 连续读数量具和非连续读数量具

(1) 测量中读数时,只能读到仪器精密度位的量具叫作非连续读数量具。卡尺、电子停表、计时计数计频仪、游标分光计度盘、数字万用表等都是非连续读数量具。

(2) 测量中读数时,可估计到仪器精密度的下一位的量具称为连续读数量具。米尺、千分尺、机械停表、指针式表头、物理天平等都是连续读数的量具。

2. 单次测量中的误差 一般测量为减小偶然误差,均采用多次测量的方法,某些实验受条件限制,只能测量一次称为单次测量。单次测量不存在平均值的问题,通常规定单次测量的误差为:使用连续读数量具进行单次测量,其绝对误差取量具精密度的一半。例如,一般米尺单次测量的绝对误差为 0.5mm。使用非连续读数的量具进行单次测量,其绝对误差取仪器的精密度,例如,电子停表单次测量的绝对误差为 0.01 秒。

3. 物理量的算术平均值 为了减小偶然误差,在可能的情况下,总是采用多次测量,将各次测量的算术平均值作为该量的真值来计算误差。设对某一物理量在相同条件下进行 k 次测量,各次测量

结果分别为 $A_1, A_2, A_3, \dots, A_k$, 则它们的算术平均值为

$$\bar{A} = \frac{A_1 + A_2 + A_3 + \dots + A_k}{k} = \sum_{i=1}^k \frac{A_i}{k} \quad (0-2)$$

这个算术平均值可认为是被测量的真值。

4. 平均绝对误差 各次测量值 A_i 与算术平均值 $\bar{A}$ 的差为 ΔA_i , 其值分别是 $\Delta A_1 = A_1 - \bar{A}$, $\Delta A_2 = A_2 - \bar{A}$, $\dots$, $\Delta A_k = A_k - \bar{A}$, 它反映了各次测量的误差。我们把平均绝对误差定义为

$$\overline{\Delta A} = \frac{|\Delta A_1| + |\Delta A_2| + |\Delta A_3| + \dots + |\Delta A_k|}{k} = \sum_{i=1}^k \frac{\Delta A_i}{k} \quad (0-3)$$

上式表明被测物理量均值的误差范围, 也就是说, 被测物理量的值在 $A + \Delta A$ 和 $A - \Delta A$ 之间, 因而测量结果用一个数学式子来表达, 称为测量结果的标准表达式

$$A = \bar{A} \pm \overline{\Delta A} \quad (0-4)$$

注意, 平均绝对误差一般取一位有效数字。

5. 标准误差 把各次测量值 A_i 与算术平均值 A 的差取其平方的平均值然后开方, 这样得到的结果称为标准误差, 即

$$\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^k \frac{(A_i - \bar{A})^2}{k}} = \sqrt{\sum_{i=1}^k \frac{(\Delta A_i)^2}{k}} \quad (0-5)$$

标准误差在正式的误差分析和计算中, 常作为偶然误差大小的量度。被测物理量的结果可表示为 $\bar{A} \pm \sigma$ 。

6. 相对误差 绝对误差可用来估计测量的误差范围, 但不能反映测量的准确程度。我们将平均绝对误差 $\overline{\Delta A}$ 与测量的算术平均值 $\bar{A}$ 的比值

$$E = \frac{\overline{\Delta A}}{\bar{A}} \quad (0-6)$$

称为平均相对误差, 用来定量表示测量精确度。

相对误差还可用百分数表示, 称为百分误差, 写作

$$E = \frac{\overline{\Delta A}}{\bar{A}} \times 100\% \quad (0-7)$$

相对误差一般取两位有效数字。

在重复前人的实验时, 我们常遇到一些已经有公认值或理论值的测量, 这时求百分误差可用公认值或理论值代替 A , 而 ΔA 则用测量值与公认值或理论值之差的绝对值表示, 所得的百分误差称为百分偏差, 相对应的绝对误差叫绝对偏差。

(三) 间接测量误差的计算

在物理量的测量中, 大多数是间接测量, 即由多个直接测得量通过一定公式计算得出最终的测量结果。因此, 直接测量的误差必然对间接测量的最后结果的误差产生影响, 这种影响是由间接测量的公式形式决定的, 具体计算间接测量误差可用相应的误差传递公式来进行计算。公式形式不同误差传递公式不同。

现假定 A 和 B 为两个直接测得量, $A = \bar{A} \pm \overline{\Delta A}$, $B = \bar{B} \pm \overline{\Delta B}$, N 为间接测量的最后结果, $N = \bar{N} \pm \overline{\Delta N}$, 下面分别讨论五种不同公式形式的误差传递公式。

1. 和的误差

若

$$N = A + B$$

则

$$\bar{N} \pm \overline{\Delta N} = (\bar{A} \pm \overline{\Delta A}) \pm (\bar{B} \pm \overline{\Delta B}) = (\bar{A} + \bar{B}) \pm (\overline{\Delta A} + \overline{\Delta B})$$

于是得算术平均值为

$$\bar{N} = \bar{A} + \bar{B}$$

考虑到在最不利的情况下可能产生的最大误差,即误差宁大勿小原则,于是得到和的平均绝对误差为

$$\overline{\Delta N} = \overline{\Delta A} + \overline{\Delta B} \quad (0-8)$$

相对误差为

$$\frac{\overline{\Delta N}}{\overline{N}} = \frac{\overline{\Delta A} + \overline{\Delta B}}{\overline{A} + \overline{B}} \quad (0-9)$$

2. 差的误差

若

$$N = A - B$$

则

$$\overline{N} \pm \overline{\Delta N} = (\overline{A} \pm \overline{\Delta A}) - (\overline{B} \pm \overline{\Delta B}) = (\overline{A} - \overline{B}) \pm (\overline{\Delta A} - \overline{\Delta B})$$

于是得算术平均值为

$$\overline{N} = \overline{A} - \overline{B}$$

同前理由,即误差宁大勿小原则,得到差的平均绝对误差为

$$\overline{\Delta N} = \overline{\Delta A} + \overline{\Delta B} \quad (0-10)$$

相对误差为

$$\frac{\overline{\Delta N}}{\overline{N}} = \frac{\overline{\Delta A} + \overline{\Delta B}}{\overline{A} - \overline{B}} \quad (0-11)$$

由此可见,和差运算中的平均绝对误差,等于各直接测量值的平均绝对误差之和。

3. 积的误差

若

$$N = A \cdot B$$

则

$$\begin{aligned} \overline{N} \pm \overline{\Delta N} &= (\overline{A} \pm \overline{\Delta A}) \cdot (\overline{B} \pm \overline{\Delta B}) \\ &= \overline{A} \cdot \overline{B} \pm \overline{B} \cdot \overline{\Delta A} \pm \overline{A} \cdot \overline{\Delta B} \pm \overline{\Delta A} \cdot \overline{\Delta B} \end{aligned}$$

于是得算术平均值为

$$\overline{N} = \overline{A} \cdot \overline{B}$$

略去二级小量 $\overline{\Delta A} \cdot \overline{\Delta B}$, 同前理由, 则平均绝对误差为

$$\overline{\Delta N} = \overline{B} \cdot \overline{\Delta A} + \overline{A} \cdot \overline{\Delta B} \quad (0-12)$$

相对误差为

$$\frac{\overline{\Delta N}}{\overline{N}} = \frac{\overline{\Delta A}}{\overline{A}} + \frac{\overline{\Delta B}}{\overline{B}} \quad (0-13)$$

4. 商的误差

若

$$N = \frac{A}{B}$$

则

$$\begin{aligned} \overline{N} \pm \overline{\Delta N} &= \frac{\overline{A} \pm \overline{\Delta A}}{\overline{B} \pm \overline{\Delta B}} = \frac{(\overline{A} \pm \overline{\Delta A})(\overline{B} \mp \overline{\Delta B})}{(\overline{B} \pm \overline{\Delta B})(\overline{B} \mp \overline{\Delta B})} \\ &= \frac{\overline{A} \cdot \overline{B} \pm \overline{B} \cdot \overline{\Delta A} + \overline{A} \cdot \overline{\Delta B} - \overline{\Delta A} \cdot \overline{\Delta B}}{\overline{B}^2 - \overline{\Delta B}^2} \end{aligned}$$

略去二级小量 $\overline{\Delta A} \cdot \overline{\Delta B}$ 和 $\overline{\Delta B}^2$, 同前理由, 则算术平均值为

$$\overline{N} = \frac{\overline{A}}{\overline{B}}$$

平均绝对误差为

$$\overline{\Delta N} = \frac{\overline{B} \cdot \overline{\Delta A} + \overline{A} \cdot \overline{\Delta B}}{\overline{B}^2} \quad (0-14)$$

相对误差为

$$\frac{\overline{\Delta N}}{N} = \frac{\overline{\Delta A}}{A} + \frac{\overline{\Delta B}}{B} \quad (0-15)$$

由此可见,乘除运算的相对误差等于各直接测量值的相对误差之和。

5. 乘方和根的误差 由积和商的相对误差公式容易证明。

若

$$N = A^n$$

则

$$\frac{\overline{\Delta N}}{N} = n \cdot \frac{\overline{\Delta A}}{A} \quad (0-16)$$

若

$$N = A^{\frac{1}{n}}$$

则

$$\frac{\overline{\Delta N}}{N} = \frac{1}{n} \cdot \frac{\overline{\Delta A}}{A} \quad (0-17)$$

上述各种运算,可推广到多个直接测得量参与运算的情况。从上述结论可以看出间接测量结果的误差计算顺序为:公式形式是和差形式,先求测量结果的绝对误差,后求相对误差;公式形式是积商形式时,先求测量结果的相对误差,后求绝对误差,其他函数的误差传递公式,我们不一一证明,表 1-1 列出一些常用公式,以备查阅。

(四) 有效数字及运算

要对某一物理量,例如长度、时间、温度、压强、电流等进行测量,都必须使用各种仪器,但每种仪器由于其结构及生产技术条件等各方面的因素的限制都有一定的精密度,使用不同精密度仪器测量,测量结果的精确度也就各有不同。

所谓仪器的精密度,除有特殊标明的仪器外,一般定义为仪器最小分格所代表的量为该仪器的精密度。例如,米尺的最小分格是 1mm,其精密度就是 1mm。其他仪器依此类推。有的仪器有特殊标记,例如某一天平的感量是 0.01g,其精密度就是 0.01g 了。电子仪表的精密度是以级数标记的,例如,某电表是 2.5 级,表示测量的误差为 2.5%。级数越小,精密度越高。

仪器的精密度限制了测量的精确度,例如,我们用米尺测量某一物体的长度,测得值是在 3.2cm 和 3.3cm 之间,能否再精确一点呢?那就要估计读数了。比如说,估计得 3.26cm。显然,最后一位数字“6”是不准确的,对不同的实验者所估计出来的数不一定相同,因而是可疑数字。我们把测量结果的数字记录到开始可疑的那一位为止。可靠的几位数字加上可疑的一位数字,统称为测量结果的有效数字。

显然,直接测量值有效数字决定于测量仪器的精密度。所以,直接测量值应根据仪器的条件写出应有的有效数字。有效数字的位数不能随意增删,因为它不仅反映了测量值的大小,而且也反映了测量的精确程度,因而表示了测量的误差范围。

间接测量值是根据直接测量值计算才得出的,它的有效数字取决于各直接测量结果,一般可按下列规则进行运算。

1. 和差运算 对多个有效数字进行和差运算时,运算结果的有效数字位数的最低一位,取到参与运算的数字中可疑数字的位数最高的那一位。也就是说,计算结果的有效数字从左至右写到开始可疑的那一位为止,后面的数字按舍入法则处理。这种方法简称“尾对齐”。

【例 1】

$$32.1 + 3.276 = 35.4$$

$$\begin{array}{r} 32.1 \\ + 3.276 \\ \hline 35.376 \end{array}$$

【例2】

$$12.4 + 2.756 = 9.6$$

$$\begin{array}{r} 12.4 \\ - 2.756 \\ \hline 9.644 \end{array}$$

计算时，我们在可疑数字下面加一横线，以便和可靠数字区别。

2. 积商运算 对多个有效数字进行积商运算时，所得结果的有效数字位数，取参与运算的数字中有效数位最少的为计算结果的有效数字位数，多余的数字按舍入法则处理，这种方法简称“位对齐”。

【例3】

$$1.323 \times 1.3 = 1.7$$

$$\begin{array}{r} 1.323 \\ \times 1.3 \\ \hline 3.969 \\ 1.323 \\ \hline 1.7199 \end{array}$$

【例4】

$$148.83 \div 1.23 = 121$$

$$\begin{array}{r} 121 \\ 1.23 \overline{)148.83} \\ \underline{123} \\ 258 \\ \underline{246} \\ 123 \end{array}$$

3. 乘方和开方 乘方和开方结果的有效数字与其底的有效数字位数相同。

关于有效数字，还应注意几点：

(1) 舍入法则：采用“四舍六入尾双留”的法则，即4以下舍，6以上进，遇5看前一位，前一位是奇数则入，偶数则舍，使留下的末位数是双数。

(2) 有效数字的位数与小数点位置无关：例如，2.638m与263.08cm这两组数字，都是4位有效数字，其精确程度都相同。如果我们注意到 $2.638\text{m} = 263.8\text{cm}$ ，就可明白，有效数字与小数点位置无关。亦可推知，有效数字的位数与单位变换无关。

(3) 有效数字与“0”的关系：例如，两组数263.8cm和0.002638km，它们的精确度都一样，显然数字前面的“0”并不影响测量结果的精确度，这两组数都是4位有效数字。所以，数字前面的“0”不算做有效数字。但是，必须特别注意，263.8cm与263.80cm这些数字上相等的量，在物理学上意义却完全不同，它们有不同的精确度。所以在数字后面的“0”要算做有效数字，在数字后面的“0”不能随便增加或删除。

(4) 有效数字与自然数或常数的关系：在运算中常遇到一些自然数或常数，如 π 、 e 、 $\sqrt{2}$ 、8等，这些数不是测量值，其有效数字可以取任意多位。但取多少位适当呢？根据运算法则可知，自然数或常数在运算中所取位数，与测量值的位数一样就行了。

(5) 有效数字与科学表示法：实验数据很大或很小时，要用科学表示法，即 10^n 来表示，但小数点前应一律取一位数字。例如，光速为 $2.997 \times 10^8/\text{s}$ ，为4位有效数字；光谱中D线波长为 $5.89 \times 10^{-7}\text{m}$ ，为3位有效数字。

(6) 为避免由于舍入过多带来的较大误差，在运算过程中，可多保留一位数字，但最后结果只能有一位可疑数字。在乘除运算时，有效数字第一位是8或9，可看成多一位有效数字来处理。例如，82可看成82.0等。

现举例说明如何根据有效数字运算法则进行误差计算。

【例5】用米尺分别对圆柱体的高和直径做3次测量，结果如下：

$$h_1 = 20.1\text{mm}, h_2 = 20.4\text{mm}, h_3 = 20.5\text{mm}$$

$$D_1 = 5.1\text{mm}, D_2 = 5.3\text{mm}, D_3 = 5.3\text{mm}$$

求圆柱体的高、直径和体积的测量结果平均值、平均绝对误差、相对误差和结果表示。

解：直接测量平均值为

$$\bar{h} = \frac{1}{3}(20.1 + 20.4 + 20.5) = 20.3(\text{mm})$$

$$\bar{D} = \frac{1}{3}(5.1 + 5.3 + 5.3) = 5.2(\text{mm})$$

直接测量的平均绝对误差为

$$\overline{\Delta h} = \frac{1}{3}(|20.1 - 20.3| + |20.4 - 20.3| + |20.5 - 20.3|) = 0.2(\text{mm})$$

$$\overline{\Delta D} = \frac{1}{3}(|5.1 - 5.2| + |5.3 - 5.2| + |5.3 - 5.2|) = 0.1(\text{mm})$$

直接测量的相对误差(百分误差)为

$$E_h = \frac{\overline{\Delta h}}{\bar{h}} \times 100\% = \frac{0.2}{20.3} \times 100\% = 0.98\%$$

$$E_D = \frac{\overline{\Delta D}}{\bar{D}} \times 100\% = \frac{0.1}{5.2} \times 100\% = 1.9\%$$

直接测量的结果表示为

$$h = \bar{h} \pm \overline{\Delta h} = 20.3 \pm 0.2(\text{mm})$$

$$D = \bar{D} \pm \overline{\Delta D} = 5.2 \pm 0.1(\text{mm})$$

间接测量的平均值为

$$V = \frac{1}{4}\pi \bar{D}^2 \bar{h} = \frac{1}{4} \times 3.14 \times 5.2^2 \times 20.3 = 4.3 \times 10^2(\text{mm}^2)$$

相对误差

$$E = \frac{\overline{\Delta V}}{\bar{V}} \times 100\% = 2 \cdot E_D + E_h = 2 \times 1.9\% + 0.98\% = 4.8\%$$

平均绝对误差

$$\frac{1}{n} \cdot \bar{A}^{n-1} \cdot \overline{\Delta A}$$

$$\overline{\Delta V} = \bar{V} \cdot E = 4.3 \times 10^2 \times 4.8\% = 0.2 \times 10^2(\text{mm}^3)$$

结果表示为

$$V = \bar{V} \pm \overline{\Delta V} = (4.3 \pm 0.2) \times 10^2(\text{mm}^3)$$

常用误差计算公式见表 1-1。

表 1-1 常用误差计算公式

函数表达式	绝对误差	相对误差
$N = A + B$	$\overline{\Delta A} + \overline{\Delta B}$	$(\overline{\Delta A} + \overline{\Delta B}) / (\bar{A} + \bar{B})$
$N = A - B$	$\overline{\Delta A} + \overline{\Delta B}$	$(\overline{\Delta A} + \overline{\Delta B}) / (\bar{A} - \bar{B})$
$N = A \cdot B$	$\bar{B} \cdot \overline{\Delta A} + \bar{A} \cdot \overline{\Delta B}$	$\overline{\Delta A} / \bar{A} + \overline{\Delta B} / \bar{B}$
$N = A/B$	$(\bar{B} \cdot \overline{\Delta A} + \bar{A} \cdot \overline{\Delta B}) / \bar{B}^2$	$\overline{\Delta A} / \bar{A} + \overline{\Delta B} / \bar{B}$
$N = A^n$	$n \bar{A}^{n-1} \overline{\Delta A}$	$n \overline{\Delta A} / \bar{A}$
$N = A^{\frac{1}{n}}$	$\frac{1}{n} \cdot \bar{A}^{\frac{1}{n}-1} \cdot \overline{\Delta A}$	$\frac{1}{n} \overline{\Delta A} / \bar{A}$
$N = \sin A$	$(\cos A) \cdot \overline{\Delta A}$	$(\cot A) \cdot \overline{\Delta A}$
$N = \cos A$	$(\sin A) \cdot \overline{\Delta A}$	$(\tan A) \cdot \overline{\Delta A}$
$N = \tan A$	$\overline{\Delta A} / \cos^2 A$	$2 \overline{\Delta A} / \sin^2 A$
$N = \cot A$	$\overline{\Delta A} / \sin^2 A$	$2 \overline{\Delta A} / \sin^2 A$
$N = KA (K \text{ 为常数})$	$K \cdot \overline{\Delta A}$	$\overline{\Delta A} / \bar{A}$

(五) 实验数据

通过物理量的测定和数据处理, 可以找到一个物理量与其他物理量的定量关系, 从而找出物理量之间的变化规律。例如: 弹簧的弹性力与伸长量成正比; 电阻上的电压与电流成正比等。所以数据处理是物理实验中的重要环节之一。在实验中, 除了大量的使用计算法外, 为了直观地表示出物理量之间的关系, 往往利用列表法和图示法等各种方法进行数据处理, 医用物理实验的数据处理主要使用列表和图示两种方法。

1. 列表法 一般说, 表格设计的原则是: 同种类的数据应列在同一行或同一列中; 在行或列之首应注明物理量的名称和单位, 若某行或某列的数据系由其他量计算而得, 还应注明其运算公式。有时在表首还应记下实验时间、实验人和环境条件等, 以便查找。具体实例见各实验中的表格。

2. 图示法 将测量的数据在坐标纸上标记出来, 形成一系列的点, 把这些点连成曲线, 这种以几种图形表示实验数据的方法, 就是图示法。它能一目了然地显示出相关物理量之间的变化规律, 图示法在医学研究中被广泛运用, 要逐步熟练掌握。做实验曲线时应注意以下几点:

(1) 选用坐标纸(直角坐标或半对数坐标等): 坐标纸大小应根据实验情况确定, 应尽可能使实验数据中有效数字位数都能标出。

(2) 确定坐标轴: 以横轴代表自变量, 纵轴代表因变量。如气体体积一定时, 压强 p 随温度 T 升高而增加, T 可作自变量, p 即为因变量。坐标轴上要标明物理量的单位。

(3) 起点(原点)和标度要适当: 起点不一定要取为零, 可根据实验情况而定。每一小格要能与实验值的有效数字相对应, 并要以不用计算能直接读出曲线上每一点的坐标为宜。横轴和纵轴的分度值不一定相同, 但应包含所有的实验数据。这样就能使曲线适中, 不致偏于一方或一角。

(4) 标注数据: 每个实验数据都要用符号在坐标纸上准确地表示出来。常用的符号有 $\times$ 、 $\square$ 、 $\odot$ 等。符号中心与实验数据吻合。

(5) 用曲线板(或直尺)画出光滑曲线: 曲线不一定通过所有的点, 只要使实验点均匀分布于曲线两侧的近旁。同一坐标纸上可以作若干曲线, 但不同曲线上的相应的实验点应以不同的符号表示。曲线作好后, 符号仍应保留, 以便复核数据, 并应在图的下方注明曲线的名称, 如图 1-1 所示。

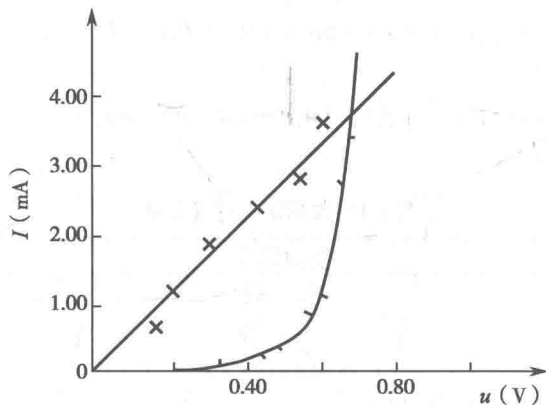


图 1-1 作图示例

三、实验课的基本要求

1. 课前认真预习, 写出预习提纲 学生在做每个物理实验前, 要认真对该实验项目教材内容进行预习, 看懂实验原理, 了解所用仪器器材的构造和使用方法, 对实验内容和实验步骤做到心中有数, 写出一个简单的预习提纲。任课教师对提纲进行检查后方可进行实验。