

高等医药院校基础医学实验教学系列教材

# 医学物理学实验

甘平 主编



科学出版社

[www.sciencep.com](http://www.sciencep.com)

醫學物理學

# 醫學物理學實驗

第二版



人民衛生出版社

高等医药院校基础医学实验教学系列教材

# 医学物理学实验

主 编 甘 平

副主编 邓 玲 李乐霞 陈龙聪

编 委 (按姓氏笔画排序)

邓 玲(第三军医大学)

陈里里(重庆医科大学)

甘 平(重庆医科大学)

陈 萍(重庆医科大学)

刘亚涛(重庆医科大学)

奉 娇(重庆医科大学)

刘向国(重庆医科大学)

高 斌(重庆医科大学)

苏爱华(重庆医科大学)

郭艾青(宁夏医学院)

李乐霞(宁夏医学院)

廖新华(第三军医大学)

陈龙聪(重庆医科大学)

谭红明(重庆医科大学)

陈仕国(第三军医大学)

熊兴良(重庆医科大学)

科 学 出 版 社

北 京

## 内 容 简 介

本教材为适应我国素质教育的需要,在参考最新出版的《医学物理学》(第2版),并结合医学物理学学习的重点、难点,编写的实验教材。本书共分为5章,分别介绍了物理学常用仪器的使用、经典验证性实验、综合性实验、创新设计性实验等47项实验内容。本实验教材的编写理念是将实验教学按照建设国家实验教学示范中心要求的实验教学模式,将基础医学实验教学作为独立的教学体系进行编写的,相信这本教材会成为辅助学生学习的一本得力的工具书。

### 图书在版编目(CIP)数据

医学物理学实验 / 甘平主编. —北京:科学出版社,2008

高等医药院校基础医学实验教学系列教材

ISBN 978-7-03-022224-4

I. 医… II. 甘… III. 医用物理学-实验-医学院校-教材 IV. R312-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 080767 号

策划编辑:李国红 / 责任编辑:周万颢 李国红 / 责任校对:朱光光

责任印制:刘士平 / 封面设计:黄 超

版权所有,违者必究。未经本社许可,数字图书馆不得使用

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

信浩彩色印装有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2008年6月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2008年6月第一次印刷 印张:15

印数:1—5 000 字数:333 000

定价:29.80元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈环伟〉)



# 《高等医药院校基础医学实验教学 系列教材》编写指导委员会

- 主任** 雷 寒(重庆医科大学)
- 副主任** 董 志(重庆医科大学)  
张绍祥(第三军医大学)
- 委员** 王亚平(重庆医科大学)  
李 和(华中科技大学同济医学院)  
侯一平(四川大学华西基础医学与法医学院)  
文 斌(川北医学院)  
梁文妹(贵阳医学院)  
李著华(泸州医学院)  
范奇元(遵义医学院)  
王燕蓉(宁夏医学院)  
罗殿中(广西医科大学)

**系列教材总策划** 徐 晨(重庆医科大学)

# 总 序

医学是一门实践性极强的科学,医学实验教学在整个医学教育中占有极为重要的地位,因此,提高医学实验教学的质量将有助于提高医学教育整体水平。改革传统的以教研室为单位的教学实验室模式,整合完善现代医学实验室功能和管理是提高医学实验教学质量的重要环节。传统医学实验教学的主要任务是让学生验证理论知识、增加感性认识,但缺乏对学生创新能力的培养,因而实验难度不高,实验条件比较简单。随着现代生命科学及其各种实验技术的飞速发展,必将对现代医学实验教学提出更高的要求,大量先进医学实验进入实验教学课程体系将成为必然的趋势,要全面推进现代医学实验教学的发展,必须加大对实验项目、实验条件、实验教学体系改革力度,这对培养适应 21 世纪医学卫生事业发展的高素质医学人才有重要意义。近年来,国内很多医学院校对传统医学教学实验建设模式进行较大力度的改革,积累了不少经验,很多经验值得我们借鉴。

围绕跨世纪医学生的培养目标,转变旧的传统观念,打破现行课程框架,重新构建新型基础医学实验教学体系的改革势在必行。现代高等医药院校实验教学强调培养学生的探索精神、科学思维、实践能力和创新能力。这就要求从根本上改变实验教学依附于理论教学的传统观念,充分认识并落实实验教学在学校人才培养和教学工作中的地位,形成理论教学与实验教学统筹协调的理念和氛围。要从人才培养体系的整体出发,建立以能力培养为主线,分层次、多模块、相互衔接的科学实验教学体系,使实验教学与理论教学既有机结合又相对独立。要把学生从二级学科狭隘的“项目”实验教学提高到基于一级学科平台的“方法”实验教学,最大限度地拓展学生的专业视野。要实现以上目标,除了对实验室进行整合外,其核心内容就是实验教学教材。为了能够编写出一套适合中西部地区高等医药院校医学教育现状的实验教学教材,在科学出版社的大力支持下,《高等医药院校基础医学实验教学系列教材》编委会以重庆医科大学为主体,协同全国 26 所高等医药院校相关专业的专家教授共同编写了这一套实验教学系列教材。全套共 10 本,包括《人体大体形态学实验》、《人体显微形态学实验》、《人体机能学实验》、《病原生物学实验》、《免疫学实验》、《生物化学与分子生物学实验》、《医用化学实验》、《医学物理学实验》、《法医学实验》和《核医学实验》。

本系列实验教材的编写理念是将实验教学按照建设国家实验教学示范中心要求的实验教学模式,借鉴国外同类实验教材的编写模式,力求做到体系创新、理念创新及编写精美。内容上将基础医学实验教学按照基础医学实验体系进行重组和有机融合,按照基础医学实验教学逻辑和规律,将实验内容分为基本实验操作及常用仪器使用、经典验证性实验、综合性实验和创新性实验等板块进行编写。本系列教材编写对象以本科、专科临床医学专业为主,兼顾预防、基础、口腔、麻醉、影像、药学、检验、护理、法医、卫生管理、医学信息等专业需求,涵盖全部医学生的基础医学实验教学。各层次学生可按照本专业培养特点和要求,通过对不同板块的必选实验项目和自选实验项目相结合修选实验课程学分。

由于基础医学实验教学模式尚存在地区和校际间的差异,加上我们的认识深度和编写水平有限,本系列教材在编写过程中可能存在偏颇之处,请广大医学教育专家谅解,欢迎同行们提出宝贵意见。

《高等医药院校基础医学实验教学系列教材》编委会

2008 年 3 月

# 前 言

物理学是近代自然科学和现代高新技术的理论基础。物理学的研究方法是培养大学生辩证唯物主义世界观和方法论的重要手段之一。物理学本质上是一门实验科学,大学物理学实验课是国内高校学生的必修基础课之一,是本科生和研究生接受系统的实验技能与实验方法训练的开端。其任务是培养学生的基本科学技能、科学实验素质和科学思维方法;培养学生严谨的治学态度、活跃的创新意识和理论联系实际的工作作风。

医学物理学实验现在是医学院校绝大多数专业的大学生必修或者必选课程之一。按照建设国家实验教学示范中心的要求,它将成为一门独立的教学课程,而不是像以前那样附属医学物理学理论课的教学。因此,它的教学内容、教学手段、教学理念和实验教材都必然将得到进一步完善,以此构建成为一个独立的完整教学体系。作者结合多年来对医学物理学实验教学的思考和教学实践,同时参考兄弟院校的经验与方法,以编写实验教学示范中心教材为契机,对医学物理学实验教学体系的构建进行一些探索性的思考。

本实验教材的编写理念是将实验教学按照建设国家实验教学示范中心要求的实验教学模式,将基础医学实验教学作为独立的教学体系进行编写的。将实验项目分成四个板块:①基本实验操作及常用仪器使用;②经典验证性实验;③综合性实验;④创新(设计)性实验。其教材内容涵盖各个层次医学生的基础医学实验教学,满足学生按照本专业培养特点和要求,通过对不同板块的必选实验项目和自选实验项目相结合选修实验课程学分。

1. 对基础和经典验证性实验模块的教学安排 除讲述物理量数据的处理方法外,其必做的实验内容偏重于基本实验技能和的学习,使学生初步了解医学物理学的实验方法和技能,并通过预习逐步培养学生自主实验的能力以及完成实验报告书写的训练。

2. 对综合性实验模块的教学安排 让学生在教师引导下自己根据专业需求完成综合性实验。教师根据实验性质和安排指导,逐步减少对实验方法和步骤的讲解,强调实验中的创新思想,启发学生自主完成实验。

3. 对创新(设计)性实验模块的教学安排 学生将在实验教师的指导下,原则上自主完成实验。主要培养学生的研究能力。要求学生能自己提出实验方案和实验对象,对学习有新体会的学生可鼓励学习撰写实验论文。

感谢重庆市物理学会医学物理学专业委员会以及宁夏医学院的领导和同行们对本教材编写给予的帮助和指导!由于编者水平所限,书中难免会出现错误或不足,请广大师生给予帮助和指正。谢谢!

编 者

2008 北京奥运年于山城重庆

# 目 录

<b>第 1 章 绪论</b> .....	(1)
第一节 医学物理学实验课的目的和要求.....	(1)
第二节 重视物理实验现象的观察.....	(3)
第三节 测量与误差理论.....	(3)
第四节 医学物理学实验中常用的实验方法 .....	(15)
<b>第 2 章 基本实验操作及常用仪器使用</b> .....	(19)
实验 2-1 基本测量及实验数据的处理 .....	(19)
实验 2-2 电子示波器的使用 .....	(25)
实验 2-3 万用电表的使用 .....	(33)
实验 2-4 集成模拟运算电路的使用 .....	(42)
实验 2-5 集成逻辑门电路的使用 .....	(45)
实验 2-6 集成稳压电源的研究 .....	(48)
实验 2-7 组合逻辑电路的分析与设计 .....	(52)
实验 2-8 触发器及其应用 .....	(54)
<b>第 3 章 经典验证性实验</b> .....	(57)
实验 3-1 液体黏滞系数的测定 .....	(57)
实验 3-2 超声波的声速测量 .....	(64)
实验 3-3 用激光单缝衍射法测量缝宽 .....	(71)
实验 3-4 用光栅测波长 .....	(75)
实验 3-5 液体表面张力系数的测定 .....	(80)
实验 3-6 G-M 计数管特性的研究 .....	(84)
实验 3-7 光电效应参量的测定 .....	(88)
实验 3-8 光电传感器的特性测试 .....	(93)
实验 3-9 用霍尔传感器测量磁场 .....	(97)
实验 3-10 等厚干涉的研究 .....	(102)
实验 3-11 弹性(杨氏)模量的测量 .....	(106)
实验 3-12 螺线管磁场测定 .....	(109)
实验 3-13 氘氘光谱测量 .....	(113)
实验 3-14 热敏电阻温度传感器特性曲线的测定 .....	(117)
实验 3-15 人体阻抗频率特性的测定 .....	(121)
实验 3-16 偏振光研究的仿真实验 .....	(125)
实验 3-17 眼镜光学原理的研究 .....	(130)

<b>第 4 章 综合性实验</b> .....	(136)
实验 4-1 核磁共振及仿真实验 .....	(136)
实验 4-2 数字图像处理及 CT 图像重建 .....	(140)
实验 4-3 CT 图像后处理技术的计算机模拟实验 .....	(145)
实验 4-4 电子自旋共振及仿真模拟实验 .....	(149)
实验 4-5 X 射线与 B 超影像系统 .....	(156)
实验 4-6 激光全息照相术 .....	(160)
实验 4-7 空间滤波 .....	(165)
实验 4-8 测定人耳的闻阈曲线 .....	(169)
实验 4-9 示波器研究简谐振动的合成 .....	(174)
实验 4-10 电子听诊器及人体心音信号的观测 .....	(182)
实验 4-11 用光敏电阻制作报警器 .....	(186)
实验 4-12 医学电子仪器的仿真设计 .....	(188)
<b>第 5 章 创新(设计)性实验</b> .....	(192)
实验 5-1 物理因子对液体力学性质的调控研究 .....	(192)
实验 5-2 物理因子对血液流变学特性的调控研究 .....	(193)
实验 5-3 光学仪器的组装与参数测量设计 .....	(194)
实验 5-4 传感器特性研究 .....	(196)
实验 5-5 位移传感器的温度补偿 .....	(198)
实验 5-6 人体电特性(阻抗、电压、电流)研究 .....	(200)
实验 5-7 用分光计测量人组织液的声阻抗 .....	(202)
实验 5-8 生物医学图像处理 .....	(204)
实验 5-9 生物医学信号处理研究 .....	(205)
实验 5-10 多用电表的设计组装 .....	(206)
<b>参考文献</b> .....	(207)
<b>附录 1 医学物理学设计性实验的基础知识</b> .....	(209)
<b>附录 2 EWB 软件的基本操作</b> .....	(217)

# 第1章 绪论

物理学是一门实验科学,要发现和掌握物理学的自然规律就必须进行科学实验。在已有知识的基础上,通过大胆假设而建立起来的物理学理论也必须在实验中得到检验并进一步发展和深化。因此,物理学是在科学实验和理论研究密切结合并且相互推动中发展的。先进的物理实验方法和技术以及物理科学的新成就不断地推动着生命科学和医学研究向前发展。同时,物理学与医学临床学科相结合已经促使了不少边缘学科的诞生(例如,生物医学工程、医学电子学,医学影像物理学、麻醉物理学和生物量子物理学等)。

## 第一节 医学物理学实验课的目的和要求

医学物理学实验是在人为创造的条件下对与医学物理学有关的自然现象进行观察和研究的科学实践。它已经成为医学科学实验的重要基础之一。应该指出,医学物理实验相对物理学理论而言,具有其相对的独立性,它不单纯是验证性的实验,它与医学研究有着直接的和间接的关系。因此,医学物理学实验课既是医学物理学教学的重要组成部分,同时由于它本身特有的目的和任务而具有相对的独立性。

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,并受到实验的检验。医学院校的医学物理学实验课程完全不同于中学阶段的物理学实验。首先,它是一门独立的实验课程;其次,它还肩负着对学生进行实验方法和实验技能训练方面的重任。要求学生通过本课程的学习,了解从事科学实验的主要过程及基本方法,从而得到从事科学实验的基本训练。

### 一、医用物理学实验课的目的

1. 通过实验,对学生进行实验方法和实验技能的基本训练,使之掌握与医学密切相关的物理量的测量原理和方法,正确合理地使用仪器,加深对物理实验设计创新思维的理解,为后续的医学基础课和专业课的学习打下牢固的基础。

2. 培养并逐步提高学生观察和分析实验现象以及理论联系实际的科学基本素质,使学生进一步巩固和加深对物理规律的理解。

3. 培养学生严肃认真的工作作风。要求学生具有主动研究的探索精神、实事求是的科学态度、团结协作、爱护国家财产和遵守纪律的优良品德。

### 二、医学物理学实验课的要求

要完成医学物理学实验课的教学任务,必须做到以下几点要求:



1. 课前预习 通过认真阅读实验教材或者相关资料(含网上信息),明确实验目的,领会实验原理和方法,了解实验步骤,设计好实验数据记录表格,通过预习掌握实验中用到的基本原理,熟悉所用仪器各部分作用。并接受实验指导教师的考查。

2. 细心实验 在开始实验前,不得擅自使用所有实验仪器。认真记住实验指导教师讲解的实验注意事项,能够借助实验教材和仪器说明书严格按照实验操作规程进行实验。在教师指导下,正确地安装并调试仪器。把实验仪器调整到正常使用状态,再进行实验;实验时首先读出并记录实验数据,复核无误后,再填入实验报告的表格中。要求字迹要清楚,不乱画、不涂改,更不许编造数据,也不得抄袭他人的数据。

3. 动手实验 要亲自动手做实验,要独立思考,不能是某一个人在做实验,其余的人却在旁边只充当记录员或观察员。应该提醒大家,大学期间学习的可贵之处就是在于它能够许多系列的、精密的和贵重的仪器供大家操作,每个同学都要有动手做实验的机会。同学们应该珍惜这段稍纵即逝的学习机会。

4. 完成报告 认真地记录所测量的数据,并按实验要求进行数据处理,得出实验结果,找出误差的原因,总结经验教训,逐步提高实验技能。实验报告要求内容完整、字迹清晰、表达明确、图表规范、分析有理,并符合实验指导教师的具体要求。实验报告要求必须使用学校统一印制的实验报告纸书写,并且按时上交。

5. 实验报告内容一般如下:

## 实验名称

### 【实验目的】

根据实验指导教师的具体要求,并参照实验教材确定其实验目的。

### 【实验器材】

要求写出实验器材的名称、型号和规格等。

### 【实验原理】

要求用自己的语言简要地叙述,不要完全抄教材。用简明的语言、公式或原理图等扼要地说明其实验的理论依据。

### 【实验步骤】

写出主要的实验操作步骤,注意重点记录实验中的关键步骤。

### 【实验记录】

自行设计(或参照实验教材给出的)实验数据的记录表格,尽可能用表格记录所有实验数据,并且在坐标纸上画出实验曲线的图形。

### 【实验结果】

包含测量数据的计算结果、误差及测量结果的正确表示。

### 【实验思考】

对实验结果进行分析讨论,小结实验过程,回答思考题以及提出改进建议等。

## 第二节 重视物理实验现象的观察

物理学实验现象的观察是医学物理学实验过程中内容最丰富和最具有特色的部分。通过实验现象的观察,可以由表及里、由此及彼地丰富测量数据的物理内涵。一个训练有素的实验者总是善于从观察中去感觉、思考、分析、总结、认识和发现问题。任何事物的客观规律都是通过相应的现象表现出来的,物理实验就是通过对这些现象的定性观察和定量测量来认识它们的,所以,整个实验过程离不开观察。是否重视实验观察也反映了实验者的实验素养。

物理学史上一系列著名的发现都源于物理学家们丰富的理论知识和高超的实验素养。他们善于通过实验观察获得重要发现,或是抓住偶然的机遇凭借敏锐的洞察力取得了意外的发现。例如,物理学家牛顿对苹果落地现象的仔细观察,促使他思考并发现了著名的万有引力定律;实验物理学家伦琴正是在企图克服阴极射线实验中的干扰情况时,意外地发现了X射线。一个有准备、有目的和有设想的实验者与一个盲目的实验者在实验素养和实验收获上是有天壤之别的。实验观察在整个实验过程中是十分重要的,希望同学们在医学物理学实验中要重视实验现象的观察,力争做到对实验现象认真、全面、准确地观察,并注意思考、分析、总结,以求有所发现。

## 第三节 测量与误差理论

医学物理学实验的定性观察和定量测定是不可分割的两个方面,为了揭示物理量间的内在数量关系,必须运用测量器具对相关的物理量进行科学地测量。

### 一、测量的定义

所谓测量就是将待测的物理量与同类量的标准单位进行比较,其倍数(可为整数,也可为小数)为该待测量值的实验过程。要确定一个物理量的大小必须使用仪器来进行测量,测量是人类认识和改造世界的重要手段之一。只有通过科学测量,才能对客观事物获得数量的概念;才能将测量结果进行归纳和分析,以便总结出一般规律。

### 二、测量的分类

#### (一) 按测量形式不同分类

测量按其测量形式不同,可分为直接测量和间接测量两大类。

1. 直接测量 能够直接用仪器读出测量值的测量,称为直接测量。例如,用米尺测量人的身高;用磅秤称量人的体重;用电子表测量人的心率以及用天平称物体质量等这一类型测量都属于直接测量。

2. 间接测量 无法直接用仪器读出测量值,只能由一个或多个直接测量值,通过已知

的函数关系计算出最终测量值的测量,称为间接测量。许多物理量(如固体的体积等)没有直接读数的仪表,只能先用仪器测量一些必需的直接测量值,然后利用这些直接测量值,通过一定的公式去计算出待测的物理量。例如,测量球体的体积可先直接测出球的直径,再通过直径与体积的计算公式求出其体积;人体内肝脏的大小,通常就是利用超声诊断仪进行间接测量的;测量导体的电阻 $R$ ,可通过直接测量加于导体两端的电压 $U$ 和流过两端的电流 $I$ 后,再由公式 $R=U/I$ 计算出来等,这一类型测量都属于间接测量。

## (二) 其他方式分类

无论是直接测量还是间接测量都可分为单次测量和多次测量。而且,多次测量又分为等精度测量和不等精度测量。在实验中对同一待测量数据,用同一仪器(或精度相同的仪器),在同一实验条件下进行的多次测量称为等精度测量;否则,称为不等精度测量。等精度测量所得到的各个测量值的可靠性是相同的。为了提高测量的精度,在物理学实验中将尽量采用等精度测量。

# 三、误差理论的基本知识

在实际的测量过程中总会有误差。现在,虽然随着科学技术的发展可以将测量误差控制得愈来愈小,但是误差仍然是不可避免的。误差理论是计量科学的重要组成部分之一。本课程仅对医学物理学实验中所要涉及的误差理论知识做一个基本介绍,使同学们对误差理论有一个基本认识,并能将这种认识运用于实验数据的处理中。

## (一) 误差的定义

在一定条件下,每一个物理量都具有一个不以人的意志为转移的确切值。这个客观存在的确切值就是该物理量的真实值,简称真值。科学测量的目的总是力图得到真实值,但是由于实验理论的近似性、实验仪器的灵敏度和分辨能力的局限性、环境的不稳定性等因素的影响,其测量值只能是真实值的近似值。因为测量仪器的精度总会存在一定的限制(如有最小刻度),不同测量者的主观观察能力各有所不同,外加由于外界环境的偶然变化都会对测量产生一定偏差。因此,任何测量值总是真值的近似值。测量值与真值(或公认值)的偏差称为测量误差,简称误差。

## (二) 误差的分类

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三种。

### 1. 系统误差

(1) 定义:在同等条件下(方法、仪器、环境和测量者都不变)多次测量同一量值时,符号和绝对值保持相对恒定或按一定规律变化的测量误差,称为系统误差。这主要是由于实验仪器或装置的不完善、实验方法本身或理论的不完善等原因所引起的。

(2) 特征:系统误差的特征是其确切性。例如,测量值总是有规律地比真值偏大,或者总是比真值偏小。产生系统误差的原因主要有:①仪器与调整误差,测量仪器的缺陷或调节不准(如砝码的质量不准、仪器的零点不准或零点漂移);②理论与方法误差,测量方法欠佳(如公式的近似性较差,达不到理论要求的条件);③环境误差,测量中未考虑某些确定性因

素(如环境温度、接触电阻、空气浮力等的影响);④个人误差,测量者个人的读数总是偏大或偏小等。

(3) 消除:系统误差是可以针对产生原因设法修正或消除的。主要方法有:选用精度较高的仪器、改进实验设计及环境条件并改良测量者读数的习惯等。

## 2. 偶然误差(随机误差)

(1) 定义:在同一条件下多次测量同一物理量时,测量值总是以不可预知的方式变化(在消除系统误差之后依然如此)的测量误差,称为偶然误差(也称为随机误差)。它是由许多不可预测的偶然因素所决定的,它出现的几率及分布具有数学统计性规律,其规律性由高等数学分支“概率论与数理统计”加以重点研究。

(2) 特征:偶然误差的特征是其随机性。其测量值虽然比真值或偏大或偏小,但服从一定的数学统计规律,为误差理论研究的主要对象。常见的情况是测量值比真值偏大或偏小的可能性(即几率)相等;小误差比大误差出现的几率大。产生偶然误差的原因主要是由于人们感观(如听觉、视觉、触觉等)分辨力的不尽相同,表现为每个人对测量值的估读能力不一致;周围环境因素的偶然变化(如环境温度、气流、气压等的波动,杂散电磁场的干扰)以及其他不可预测的次要因素的影响。

(3) 减小:偶然误差是不可避免的,也是无法完全控制的。但是由于偶然误差的出现服从一定的统计规律,所以,可以通过一定的数学相关理论(称之为误差理论)来减小它。例如,采用增加等精度测量的测量次数取平均值的方法来减小偶然误差等。

## 3. 过失误差(粗大误差)

(1) 定义:由于测量者粗心大意或实验条件发生突变或者因实验方法错误等原因而引起的测量误差,称为过失误差(也称为粗大误差)。

(2) 特征:它是在测量的客观条件下无法合理解释的那些突出误差。这主要是由于观测者在观测、记录和整理数据的过程中,由于实验方法错误、缺乏经验、粗心大意或疲劳等原因引起的。它与测量中的系统误差和偶然误差是有根本区别的。

(3) 消除:这种错误应当而且能够通过实验者采取严肃认真的态度、纠正实验方法、仔细地测量而加以克服。在科学实验中,应该尽量消除过失误差。由于缺乏实验经验,刚进入实验阶段的学生容易出现过失误差。因此,初学者应在实验指导教师的帮助下,不断总结经验,提高实验技能,尽量防止过失误差的出现。

### (三) 偶然误差的估算

由于系统误差和过失误差是可以消除的,因此在以下的讨论中,统一约定在一般情况下系统误差和粗大误差已经修正或消除,只讨论偶然误差对测量结果的影响。

#### 1. 直接测量的误差估算

(1) 单次直接测量的误差:在医学物理学实验中,由于条件的不许可或者对测量准确度要求不高等原因,对物理量只进行了一次直接测量。在这种单次测量的情况下,可将仪器出厂检定书上的或仪器上直接注明的仪器误差作为单次测量的误差。如果仪器上没有注明仪器误差,也可取仪器的最小刻度的一半作为单次测量的误差。

(2) 多次直接测量的误差:一般情况下,待测量的真值是不知道的。根据误差理论的数学推导结论可知,为了减少偶然误差,在可能的情况下尽量采用等精度的多次测量的方法,

将各测量值的算术平均值作为测量的结果。例如,在同样条件下对某物理量的  $n$  次测量值分别为  $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ , 用  $\bar{x}$  表示其算术平均值:

$$\bar{x} = \frac{1}{n}(x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_n) = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (1-3-1)$$

根据误差理论可知,在消除系统误差后,通过等精度多次测量的算术平均值最接近于真值,而且随着测量次数  $n$  的增加,其算术平均值将愈来愈接近真值。因此,在这种情况下,测定值的偶然误差可用算术平均偏差或者均方根偏差表示出来。

1) 算术平均偏差是各次测量值与算术平均值之差(称为偏差)绝对值的平均值。用  $\Delta x$  表示算术平均偏差,则

$$\Delta x = \frac{1}{n}(|x_1 - \bar{x}| + |x_2 - \bar{x}| + |x_3 - \bar{x}| + \dots + |x_n - \bar{x}|) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_i - \bar{x}| \quad (1-3-2)$$

2) 均方根偏差也称为标准偏差。它是将各次测量值与平均值的差值先平方求其平均值,然后再开方。其均方根偏差的计算式为

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (1-3-3)$$

算术平均偏差和标准偏差都可以作为测定值误差大小的量度。它们都表示在一组多次测量的数据中,各个测量数据之间分散的程度。如果算术平均偏差或标准偏差较大,则表示各数据之间差别较大,该测量不够精密。

有一种特殊情况:即重复测量  $n$  次,每次的测量值不变,这种情况并不是说明它的误差为零,而是说明此时的偶然误差相对于仪器的精度而言比较小,仪器的精度不足以反映出其微小差别。这时可直接估读其绝对误差为仪器最小分度值的一半。

必须指出,误差是测量值与真值之差,而偏差是测量值与平均值之差,这两者是有差别的。但当测量次数很多时,在仪器精确可靠的条件下,算术平均值将很接近真值。因此,在常规的医学物理学实验中不必去区分偏差和误差的细微差别,而把算术平均偏差和标准偏差分别称为算术平均误差和标准误差。

### (3) 测量结果的表示:

#### 1) 测量结果绝对误差的表达式

测定值  $x$  最终结果(即测量结果)的正确表达式为

$$\begin{aligned} x &= \bar{x} \pm \Delta x (\text{物理单位}) \text{ 或者 } x = (\bar{x} \pm \Delta x) \text{ 物理单位} \\ x &= \bar{x} \pm \sigma (\text{物理单位}) \text{ 或者 } x = (\bar{x} \pm \sigma) \text{ 物理单位} \end{aligned} \quad (1-3-4)$$

式(1-3-4)为所有实验报告(包括公开发表的科研论文)中【实验结果】分别用算术平均误差和标准误差的最终表达式。式中的“ $\pm$ ”号表示测量结果的误差范围,即每次的测量值可能比算术平均值  $\bar{x}$  大一些,也可能比  $\bar{x}$  小一些,其误差范围的大小将分别用算术平均误差和标准误差  $\Delta x$ (或  $\sigma$ )表示,它在误差理论中有严格的数学定义。例如,用直尺测得某人的身高为  $L_1 = 1.720 \pm 0.005(\text{m})$ 。其中  $1.720\text{m}$  为测量的最终结果,而  $0.005\text{m}$  就是它的

误差范围(即不确定度)。

注意:式中的  $\bar{x}$  与  $\Delta x$ (或  $\sigma$ ) 的物理单位必须统一;而且从下面的讨论可知: $\Delta x$ (或  $\sigma$ ) 因为单次测量、多次直接测量和间接测量方法的不同而必须按照相应的不同计算方法进行具体的计算。

上述的平均误差或标准误差都是以误差的绝对值形式来表示的,称为绝对误差。由于测量结果的精确程度不仅与绝对误差有关,而且与待测量本身的大小有关。因此,在误差理论中还引入了相对误差的表达式。

## 2) 测量结果相对误差的表达式

用  $E_r$  表示相对误差。测量结果相对误差的表达式为

$$E_r = \frac{\Delta x}{\bar{x}} \quad (1-3-5)$$

另外,相对误差也常用百分比的形式来表示,故又称为百分误差。即

$$E_r = \frac{\Delta x}{\bar{x}} \times 100\% \quad (1-3-6)$$

举例说明相对误差的意义。同样,用直尺测得某人的身高为  $L_1 = 1.720 \pm 0.005(\text{m})$ , 而他的食指的平均直径(将食指横截面近似看做圆形)为  $L_2 = 0.020 \pm 0.001(\text{m})$ , 按照相对误差的定义,它们分别为

$$E_{r1} = \frac{0.005}{1.720} \times 100\% = 0.29\% \quad E_{r2} = \frac{0.001}{0.020} \times 100\% = 5\%$$

很显然,虽然后者的绝对误差比前者小,但其相对误差却比前者的大得很多。这说明前一个测量结果更准确些。

2. 间接测量的误差估算(误差传递的基本公式) 由于间接测量是利用直接测量值通过一定的公式计算出来的最终结果,所以,既然公式中的直接测量值是有误差的,那么间接测量值也必然有误差。而且它们两者之间的联系规律就是误差理论中的误差传递公式。

假设  $N$  为间接测量值,而  $x, y, z, \dots$  为直接测量值,它们之间的数学函数关系为

$$N = f(x, y, z, \dots)$$

如果直接测量值分别为  $x = \bar{x} \pm \Delta x; y = \bar{y} \pm \Delta y; z = \bar{z} \pm \Delta z, \dots$ , 将这些直接测量值的表达式代入前面的公式,则可求得间接测量值测量结果的最终表达式

$$N = \bar{N} \pm \Delta N(\text{单位}), \quad E_r = \frac{\Delta N}{\bar{N}} \times 100\%$$

式中,  $\bar{N} = f(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}, \dots)$  为间接测量值的最佳值(或算术平均值);而  $\Delta N$  为间接测量值的算术平均偏差(或标准偏差),其具体计算方法如下。

(1) 加减法运算的误差估算:假设  $N$  与  $x, y, z$  的函数关系为  $N = x \pm y \pm z$ , 则有  $N = (\bar{x} \pm \Delta x) \pm (\bar{y} \pm \Delta y) \pm (\bar{z} \pm \Delta z)$

所以,间接测量的最佳值  $\bar{N} = \bar{x} \pm \bar{y} \pm \bar{z}$

绝对误差  $\Delta N = \pm \Delta x \pm \Delta y \pm \Delta z$



考虑到最不利的情况可能出现的最大误差,

$$\text{则} \quad \Delta N = \Delta x + \Delta y + \Delta z \quad (1-3-7)$$

$$\text{它们的相对误差为} \quad E_r = \frac{\Delta x + \Delta y + \Delta z}{\bar{x} \pm \bar{y} \pm \bar{z}} \quad (1-3-8)$$

(2) 乘除法运算的误差估算:假设  $N$  与  $x, y, z$  的函数关系为  $N = x \times y$  或  $N = x/y$ , 其中  $x, y$  为直接测量值, 则可以证明, 其间接测量值的平均值  $\bar{N} = \bar{x} \cdot \bar{y}$  (或  $\bar{x}/\bar{y}$ ), 它们的相对误差为

$$E_r = E_x + E_y = \frac{\Delta x}{\bar{x}} + \frac{\Delta y}{\bar{y}} \quad (1-3-9)$$

式中  $E_x$  和  $E_y$  为直接测量值  $x, y$  的相对误差。

又因为  $E_r = \frac{\Delta N}{\bar{N}}$ , 所以, 其间接测量值的绝对误差为

$$\Delta N = E \cdot \bar{N} \quad (1-3-10)$$

综上所述, 在直接测量值进行加减法运算时, 其间接测量值的绝对误差等于各直接测量值的绝对误差之和; 而在直接测量值进行乘除法运算时, 它的相对误差等于各直接测量值的相对误差之和。因此, 当间接测量值的计算公式中只含有加减法运算时, 一般方法是先计算绝对误差, 再计算相对误差; 而当计算公式中只含有乘除法运算时, 则一般先计算相对误差, 再计算绝对误差。

(3) 一般运算的误差估算(误差传递的基本公式): 设  $N = f(x, y, z, \dots)$ , 则间接测量在一般情况下的误差公式可由对函数的全微分求得

$$dN = \frac{\partial f}{\partial x} dx + \frac{\partial f}{\partial y} dy + \frac{\partial f}{\partial z} dz + \dots \quad (1-3-11)$$

上式称为误差传递的基本公式。式中  $\frac{\partial f}{\partial x} dx, \frac{\partial f}{\partial y} dy, \frac{\partial f}{\partial z} dz, \dots$  各项叫做分误差;  $\frac{\partial f}{\partial x}, \frac{\partial f}{\partial y}, \frac{\partial f}{\partial z}, \dots$  的数学术语为一阶偏导数, 在误差理论中称之为误差的传递系数;  $dN$  相当于间接测量值的绝对误差。将式中的  $dN, dx, dy, dz, \dots$  分别用  $\Delta N, \Delta x, \Delta y, \Delta z, \dots$  代表, 并考虑到误差可能出现的最大值, 右方各项均取绝对值, 因此, 绝对误差的传递公式为

$$\Delta N = \left| \frac{\partial f}{\partial x} \Delta x \right| + \left| \frac{\partial f}{\partial y} \Delta y \right| + \left| \frac{\partial f}{\partial z} \Delta z \right| + \dots$$

若误差传递系数中的  $x, y, z, \dots$  分别用  $\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}, \dots$  代替, 则得相对误差公式为

$$E_r = \frac{\Delta N}{\bar{N}} = \frac{1}{\bar{N}} \left( \left| \frac{\partial f}{\partial x} \Delta x \right| + \left| \frac{\partial f}{\partial y} \Delta y \right| + \left| \frac{\partial f}{\partial z} \Delta z \right| + \dots \right) \quad (1-3-12)$$

表 1-3-1 列出了常用函数的误差传递公式。在实际计算中发现, 误差合成时起主要作用的常常只是其中一两项或少数几项分误差。因此, 当某一项分误差对总误差的贡献很小(例如占总误差的 1/10 以下)时, 则可把该项分误差略去不计。这一结论在实验方法的设计