



全国中医药行业高等教育“**十二五**”规划教材



全国高等中医药院校规划教材(第九版)

物理学实验

供中药学类、药学类、制药工程等专业用

主 编 © 章新友 侯俊玲

全国百佳图书出版单位

中国中医药出版社



全国中医药行业高等教育“十二五”规划教材
全国高等中医药院校规划教材（第九版）

物理学实验

（新世纪第三版）

（供中药学类、药学类、制药工程等专业用）

主 编 章新友（江西中医学院）
侯俊玲（北京中医药大学）
副主编 杨华元（上海中医药大学）
顾柏平（南京中医药大学）
韦相忠（广西中医药大学）
李 光（长春中医药大学）
刚 晶（辽宁中医药大学）

中国中医药出版社

· 北 京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

物理学实验/章新友, 侯俊玲主编. —3 版. —北京: 中国中医药出版社,
2012.7

全国中医药行业高等教育“十二五”规划教材

ISBN 978-7-5132-0956-4

I. ①物… II. ①章… ②侯… III. ①物理学—实验—高等学校—教材
IV. ①04-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 109468 号

中国中医药出版社出版

北京市朝阳区北三环东路 28 号易亨大厦 16 层

邮政编码 100013

传真 010 64405750

北京市卫顺印刷厂印刷

各地新华书店经销

*

开本 787×1092 1/16 印张 9 字数 197 千字

2012 年 7 月第 3 版 2012 年 7 月第 1 次印刷

书号 ISBN 978-7-5132-0956-4

*

定价 15.00 元

网址 www.cptcm.com

如有印装质量问题请与本社出版部调换

版权专有 侵权必究

社长热线 010 64405720

购书热线 010 64065415 010 64065413

书店网址 csln.net/qksd/

新浪官方微博 <http://e.weibo.com/cptcm>

全国中医药行业高等教育“十二五”规划教材

全国高等中医药院校规划教材（第九版）

专家指导委员会

- 名誉主任委员** 王**国**强（卫生部副部长兼国家中医药管理局局长）
邓**铁**涛（广州中医药大学教授 国医大师）
- 主任委员** 李**大**宁（国家中医药管理局副局长）
- 副主任委员** 王**永**炎（中国中医科学院名誉院长 教授 中国工程院院士）
张**伯**礼（中国中医科学院院长 天津中医药大学校长 教授 中国工程院院士）
洪**净**（国家中医药管理局巡视员兼人事教育司副司长）
- 委员（以姓氏笔画为序）**
- 王**华**（湖北中医药大学校长 教授）
王**键**（安徽中医学院院长 教授）
王**之**虹（长春中医药大学校长 教授）
王**北**婴（国家中医药管理局中医师资格认证中心主任）
王**亚**利（河北医科大学副校长 教授）
王**国**辰（全国中医药高等教育学会教材建设研究会秘书长 中国中医药出版社社长）
王**省**良（广州中医药大学校长 教授）
车**念**聪（首都医科大学中医药学院院长 教授）
石**学**敏（天津中医药大学教授 中国工程院院士）
匡**海**学（黑龙江中医药大学校长 教授）
刘**振**民（全国中医药高等教育学会顾问 北京中医药大学教授）
孙**秋**华（浙江中医药大学党委书记 教授）
严**世**芸（上海中医药大学教授）
李**大**鹏（中国工程院院士）
李**玛**琳（云南中医学院院长 教授）
李**连**达（中国中医科学院研究员 中国工程院院士）
李**金**田（甘肃中医学院院长 教授）
杨**关**林（辽宁中医药大学校长 教授）
吴**以**岭（中国工程院院士）

吴咸中 (天津中西医结合医院主任医师 中国工程院院士)

吴勉华 (南京中医药大学校长 教授)

肖培根 (中国医学科学院研究员 中国工程院院士)

陈可冀 (中国中医科学院研究员 中国科学院院士)

陈立典 (福建中医药大学校长 教授)

范永升 (浙江中医药大学校长 教授)

范昕建 (成都中医药大学校长 教授)

欧阳兵 (山东中医药大学校长 教授)

周 然 (山西中医学院院长 教授)

周永学 (陕西中医学院院长 教授)

周仲瑛 (南京中医药大学教授 国医大师)

郑玉玲 (河南中医学院院长 教授)

胡之璧 (上海中医药大学教授 中国工程院院士)

耿 直 (新疆医科大学副校长 教授)

高思华 (北京中医药大学校长 教授)

唐 农 (广西中医药大学校长 教授)

梁光义 (贵阳中医学院院长 教授)

程莘农 (中国中医科学院研究员 中国工程院院士)

傅克刚 (江西中医学院院长 教授)

谢建群 (上海中医药大学常务副校长 教授)

路志正 (中国中医科学院研究员 国医大师)

廖端芳 (湖南中医药大学校长 教授)

颜德馨 (上海铁路医院主任医师 国医大师)

秘 书 长 王 键 (安徽中医学院院长 教授)

洪 净 (国家中医药管理局巡视员兼人事教育司副司长)

王国辰 (全国中医药高等教育学会教材建设研究会秘书长)

中国中医药出版社社长)

办公室主任 周 杰 (国家中医药管理局人事教育司教育处处长)

林超岱 (中国中医药出版社副社长)

李秀明 (中国中医药出版社副社长)

办公室副主任 王淑珍 (全国中医药高等教育学会教材建设研究会副秘书长)

中国中医药出版社教材编辑部主任)

裴 颢 (中国中医药出版社教材编辑部副主任)

全国中医药行业高等教育“十二五”规划教材
全国高等中医药院校规划教材(第九版)

《物理学实验》编委会

主 编 章新友 (江西中医学院)

侯俊玲 (北京中医药大学)

副主编 杨华元 (上海中医药大学)

顾柏平 (南京中医药大学)

韦相忠 (广西中医药大学)

李 光 (长春中医药大学)

刚 晶 (辽宁中医药大学)

编 委 (以姓氏笔画为序)

王 贺 (黑龙江中医药大学)

王 勤 (贵阳中医学院)

刘 尉 (广州中医药大学)

刘 慧 (成都中医药大学)

陈艳霞 (大连医科大学)

杨国平 (浙江中医药大学)

张 莉 (北京中医药大学)

张春强 (江西中医学院)

高建平 (甘肃中医学院)

郭晓玉 (河南中医学院)

凌高宏 (湖南中医药大学)

黄 浩 (福建中医药大学)

前言

全国中医药行业高等教育“十二五”规划教材是为贯彻落实《国家中长期教育改革和规划纲要(2010-2020年)》、《教育部关于“十二五”普通高等教育本科教材建设的若干意见》和《中医药事业发展“十二五”规划》，依据行业人才需求和全国各高等中医药院校教育教学改革新发展，在国家中医药管理局人事教育司的主持下，由国家中医药管理局教材办公室、全国中医药高等教育学会教材建设研究会在总结历版中医药行业教材特别是新世纪全国高等中医药院校规划教材建设经验的基础上，进行统一规划建设的。鉴于由中医药行业主管部门主持编写的全国高等中医药院校规划教材目前已出版八版，为便于了解其历史沿革，同时体现其系统性和传承性，故本套教材又可称“全国高等中医药院校规划教材(第九版)”。

本套教材坚持以育人为本，重视发挥教材在人才培养中的基础性作用，充分展现我国中医药教育、医疗、保健、科研、产业、文化等方面取得的新成就，以期成为符合教育规律和人才成长规律的科学性、先进性、适用性的优秀教材。

本套教材具有以下主要特色：

1. 继续采用“政府指导，学会主办，院校联办，出版社协办”的运作机制

在规划、出版全国中医药行业高等教育“十五”、“十一五”规划教材时（原称“新世纪全国高等中医药院校规划教材”新一版、新二版，亦称第七版、第八版，均由中国中医药出版社出版），国家中医药管理局制定了“政府指导，学会主办，院校联办，出版社协办”的运作机制，经过两版教材的实践，证明该运作机制符合新时期教育部关于高等教育教材建设的精神，同时也是适应新形势下中医药人才培养需求的更高效的教材建设机制，符合中医药事业培养人才的需要。因此，本套教材仍然坚持这个运作机制并有所创新。

2. 整体规划，优化结构，强化特色

此次“十二五”教材建设工作对高等中医药教育3个层次多个专业的必修课程进行了全面规划。本套教材在“十五”、“十一五”优秀教材基础上，进一步优化教材结构，强化特色，重点建设主干基础课程、专业核心课程，加强实验实践类教材建设，推进数字化教材建设。本套教材数量上较第七版、第八版明显增加，专业门类上更加齐全，能完全满足教学需求。

3. 充分发挥高等中医药院校在教材建设中的主体作用

全国高等中医药院校既是教材使用单位，又是教材编写工作的承担单位。我们发出关于启动编写“全国中医药行业高等教育‘十二五’规划教材”的通知后，各院校积极响应，教学名师、优秀学科带头人、一线优秀教师积极参加申报，凡被选中参编的教师都以积极热情、严肃认真、高度负责的态度完成了本套教材的编写任务。

4. 公开招标，专家评议，健全主编遴选制度

本套教材坚持公开招标、公平竞争、公正遴选主编原则。国家中医药管理局教材办公室和全国中医药高等教育学会教材建设研究会制订了主编遴选评分标准,经过专家评审委员会严格评议,遴选出一批教学名师、高水平专家承担本套教材的主编,同时实行主编负责制,为教材质量提供了可靠保证。

5. 继续发挥执业医师和职称考试的标杆作用

自我国实行中医、中西医结合执业医师准入制度以及全国中医药行业职称考试制度以来,第七版、第八版中医药行业规划教材一直作为考试的蓝本教材,在各种考试中发挥了权威标杆作用。作为国家中医药管理局统一规划实施的第九版行业规划教材,将继续在行业的各种考试中发挥其标杆性作用。

6. 分批进行,注重质量

为保证教材质量,本套教材采取分批启动方式。第一批于2011年4月启动中医学、中药学、针灸推拿学、中西医临床医学、护理学、针刀医学6个本科专业112种规划教材。2012年下半年启动其他专业的教材建设工作。

7. 锤炼精品,改革创新

本套教材着力提高教材质量,努力锤炼精品,在继承与发扬、传统与现代、理论与实践的结合上体现了中医药教材的特色;学科定位准确,理论阐述系统,概念表述规范,结构设计更为合理;教材的科学性、继承性、先进性、启发性及教学适应性较前八版有不同程度提高。同时紧密结合学科专业发展和教育教学改革,更新内容,丰富形式,不断完善,将学科、行业的新知识、新技术、新成果写入教材,形成“十二五”期间反映时代特点、与时俱进的教材体系,确保优质教育资源进课堂,为提高中医药高等教育本科教学质量和人才培养质量提供有力保障。同时,注重教材内容在传授知识的同时,传授获取知识和创造知识的方法。

综上所述,本套教材由国家中医药管理局宏观指导,全国中医药高等教育学会教材建设研究会倾力主办,全国各高等中医药院校高水平专家联合编写,中国中医药出版社积极协办,整个运作机制协调有序,环环紧扣,为整套教材质量的提高提供了保障机制,必将成为“十二五”期间全国高等中医药教育的主流教材,成为提高中医药高等教育教学质量和人才培养质量最权威的教材体系。

本套教材在继承的基础上进行了改革与创新,但在探索的过程中,难免有不足之处,敬请各教学单位、教学人员以及广大学生在使用中发现问题及时提出,以便在重印或再版时予以修正,使教材质量不断提升。

国家中医药管理局教材办公室

全国中医药高等教育学会教材建设研究会

中国中医药出版社

2012年6月

编写说明

《物理学实验》是根据全国中医药行业高等教育“十二五”规划教材《物理学》教学大纲对物理学实验的教学要求,并参照教育部高等学校医药公共基础课程教学指导委员会自然科学课程教学指导委员会所制定的《医药类专业大学物理实验课程教学基本要求》,为满足全国中医药行业高等教育“十二五”期间中药学类本科专业《物理学实验》课程教学的需要而编写。本教材由全国17所高等中医药院校从事《物理学》和《物理学实验》教学,具有多年教学经验和物理学研究的教师联合编写。本教材供高等中医药院校中药学、药学、制药工程等本科专业的学生使用,也可供其他药学类等本科专业学生或从事《物理学实验》教学的工作者选用。

本教材力求反映物理学在中医药领域应用的最新成果,注重培养学生的创新能力和实践能力。共精选了包括基本测量、刚体转动、流体力学、声学、电磁学和光学等16个实验。每个实验的教学从实验目的、实验器材、仪器描述、实验原理、实验步骤、实验记录、计算结果和注意事项等,都提出了明确的要求。在每个实验中都附有“思考题”,供学生课后复习、思考。尤其是对实验数据的处理和分析,以及误差的计算提出了更高的要求,旨在着重培养学生的数据处理、独立思考和创新能力,亦为今后毕业论文中的数据处理和分析打下扎实的基础。为使本教材更能适应全国高等中医药院校的实验教学条件,针对全国各高等中医药院校仪器设备存在差异的实际情况,有些实验采用了不同的仪器或方法,以便各高校依据自己学校的实验条件选用。书后还附录了与物理学实验相关的常数等内容。

本教材在编写过程中得到了江西中医学院领导,以及全国各兄弟院校领导和同行的支持与帮助,在此一并表示感谢。由于我们水平有限,加上时间仓促,书中缺点和错误在所难免,希望广大读者和教师提出宝贵意见,以便再版时修订提高。

编者

2012年6月

目 录

绪论	1
实验一 基本测量	12
1-1 游标卡尺和螺旋测微计的使用	12
1-2 读数显微镜和物理天平的使用	19
实验二 转动惯量的测量	24
实验三 液体黏滞系数的测定	28
3-1 用乌式黏度计测定酒精的黏滞系数	28
3-2 用奥氏黏度计测定乙醇的黏滞系数	31
3-3 用斯托克斯公式测定液体的黏滞系数	33
实验四 液体表面张力系数的测量	37
4-1 用拉脱法测量液体表面张力系数	37
4-2 用双管补偿法测量液体表面张力系数	40
实验五 用模拟法测量静电场的分布	47
实验六 惠斯通电桥的使用	52
实验七 万用电表的使用	56
实验八 用电位差计测量微小电压和电动势	64
8-1 测量微小电压	64
8-2 测量电动势	69
实验九 示波器的原理和使用	72
实验十 超声声速的测定	80
实验十一 用阿贝折射仪测定物质的折射率	94
实验十二 迈克耳逊干涉仪的使用	101
实验十三 用旋光计测量液体的浓度	107
实验十四 分光计的使用	111
实验十五 用光电比色计测定溶液的浓度	120
实验十六 显微摄影	123
附录	127
参考文献	131

绪 论

物理学是研究物质运动最基本、最普遍的规律的科学，也是现代医学的基础学科之一，它的理论和实验方法被广泛地应用于医药学中，并且正在积极地推动着医药学的发展。物理学又是一门实验科学，其规律的发现和理论的建立，都必须以严格的物理学实验为基础。因此，要掌握现代医学科学知识和技术，就必须具备一定的物理学理论知识、物理实验的方法和技能。在高等医学院校中，“物理学实验”是配合“物理学”而开设的相对独立的一门课程。本课程除了物理学实验所包含的一些基本内容之外，把侧重点放在与医学、生命科学联系较为密切的一些实验上。它与理论课内容相辅相成，既有联系，又相对独立。通过“物理学”课程的学习，使学生能获得在今后的实际工作和医学理论研究所必需的物理学知识；而“物理学实验”所传授给学生的方法和技能，使他们能运用这些知识去解决医学实践中的某些问题，培养他们解决实际问题的能力，培养他们严谨的科学作风。

一、物理学实验目的和主要环节

（一）物理学实验目的和任务

1. 通过实验使学生直接观察物理现象，进一步分析和研究物理现象，探讨其产生的原因及规律，巩固和加深对物理现象及规律的认识。
2. 通过实验使学生熟悉仪器的结构性能和操作方法，学习正确地使用仪器，学会对实验数据的科学处理，掌握物理实验的方法，提高实验技能。
3. 通过实验培养学生严肃认真、细致谨慎、一丝不苟、实事求是的科学态度，克服困难、坚韧不拔的工作作风。

（二）物理学实验的主要环节

要学好这门课程不但要花气力、下工夫，还要掌握一定的方法。实验之前，必须认真预习，实验过程中应该认真操作，实验之后能够认真总结，并提供完整准确的实验报告。对这三个主要环节的具体要求是：

1. 课前预习 课前预习是能否使实验顺利进行的关键。要求做到：详细阅读实验指导书，明确实验目的，弄清实验原理，了解实验方法；对实验仪器的性能和使用方法

有初步认识,明确实验步骤和注意事项,避免盲目操作、损坏仪器;根据实验要求拟定实验方案和步骤,设计实验数据记录表格。

2. 课堂实验操作 通过实验操作,对物理现象进行观察和研究,增强对理论知识的理解,促进实验技能的提高。要求做到:了解和遵守实验室的规章制度;操作前先认识和熟悉实验所用仪器,并认真检查,了解仪器的性能和使用方法;按照实验步骤进行操作,并认真进行观察;将测量数据填写在事先准备好的表格内,计算出必要的结果,出现异常数据时,要增加测量次数;实验完毕,整理仪器,保持实验室的清洁。

3. 出具实验报告 实验报告是进行实验的最终总结。要认真细致地对实验数据作出整理和计算,对结果加以分析,在此基础上写出实验报告。实验报告要求有以下几方面的内容:

- ① 实验题目;
- ② 实验目的;
- ③ 实验器材;
- ④ 简明的实验原理;
- ⑤ 简要的实验步骤;
- ⑥ 实验数据及其处理(所测量数据,实验结果的计算,误差的计算);
- ⑦ 结果分析,必要时绘出图线;
- ⑧ 记录实验时的环境条件,如室温、气压等;
- ⑨ 讨论总结,回答相关问题。

二、误差理论

(一) 测量的误差及误差的计算

1. 物理量的测量与测量误差 在物理实验过程中,不仅要物理现象的变化过程作定性的观察,而且还要对一系列物理量进行定量的测定,从而探索寻找物理量之间的关系,从这个意义上来说,物理实验首先碰到的就是测量问题。测量某一物理量,实际上就是用一个确定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,就属于这一类,都是用基本测量仪器就可直接测出结果的。间接测量是依靠直接测量的结果,再经过物理公式的计算,才能得出的物理量。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结果。大多数测量都属于这一类。

测量的目的是力图得到真值 X_0 。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,由于仪器精度、测量方法、测量程序、实验环境、实验者的观察力等原因,测量都不可能绝对准确。这就导致了所测得的值 X 与真值 X_0 之间有一个差值 $\Delta X = X - X_0$ 。这个 ΔX 就是我们所说的误差。

在测量中,误差总是存在的,同时又是可以而且应当努力降低的。

误差来源的分析、误差大小的估算对实验工作十分重要,它将直接影响到测量水平的高低。

2. 测量误差的分类 任何一个物理量的测量都不可避免地存在误差。根据误差产生的性质及导致误差产生的原因,我们可以把它分为系统误差、偶然误差和过失误差。

(1) **系统误差** 系统误差是由于测量理论本身不严密、测量方法不尽完善、测量设备的缺陷、周围环境(温度、湿度、气压、电磁场等)变化的影响或测量者自身的习惯等因素所引起的误差。例如,测物体的重量时没有考虑到空气浮力的影响,测时间时秒表走时不准确,测高度时尺子没调到铅直,测量者读数时习惯于将头侧偏等等。系统误差的特点是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,例如,修正仪器、改进测量方法、对影响实验的有关因素加以周密考虑等,系统误差是能够尽量减小或消除的。

系统误差的发现是比较困难的,它需要测量者有较为丰富的实践经验和一定的理论知识。从实验方法的角度上考虑,可以采取扩大实验范围,即用不同的实验方法或同一种方法改变实验条件,对测量过程进行细致的观察、对比,分析各种实验手段或各种状态下所测到的结果,找出它们之间的差异等,这些将有助于进一步分析产生系统误差的因素,并尽可能将其降低到最低程度。

(2) **偶然误差** 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。例如测量者感官分辨能力的限制、电压的不稳定、温度的不均匀、仪表设备受震动等偶然因素。其发生纯属偶然,其大小和分布受或然率支配。由于这类偶然性无法消除,所以偶然误差是不可避免的。然而偶然误差有一个特征:各次测量的误差是随机出现的,时而偏大,时而偏小,时正时负,方向不一定,但从统计意义上讲,在重复多次测量过程中,出现测量值偏离真值的大小与偏离方向的机会是均等的,而且随着测量次数的增多,这一规律表现得愈为明显。正是由于这一点,在客观上要求我们对待测物体进行尽可能多的重复测量。将重复测量所得到的一系列测量值经过适当的数据处理之后,就可能使偶然误差大大降低。即:减小偶然误差发生的方法,是进行多次重复测量后进行误差处理。

(3) **过失误差** 过失误差是人为的误差,实验者的粗心大意、实验方法的不当、使用仪器不准确、读错数据、数据记录的笔误等,均可造成过失误差。因此,实验者必须要有严肃认真的态度,实事求是和一丝不苟的科学作风,以避免过失误差。

3. 测量结果的表示

(1) 测量结果的最佳值(近真值)

① **算术平均值**。对某一物理量在相同条件下进行 k 次测量,各次结果分别为 X_1 、 X_2 、 X_3 、 $\dots$ 、 X_k ,则它们的算术平均值为

$$\bar{X} = \frac{X_1 + X_2 + X_3 + \dots + X_k}{k} = \sum_{i=1}^k \frac{X_i}{k}$$

根据偶然误差的抵偿性,随着测量次数的无限增加,偶然误差的算术平均值趋近于零,那么此测量值的算术平均值也将趋近于真值。这个算术平均值可认为是被测物理量的最佳值或近真值。为了减小偶然误差,在可能的情况下,总是采用多次测量,并将其算术平均值作为被测物理量的真值。

②我们还经常遇到一些被测量已经有公认值(或理论值),这时,可用公认值(或理论值)作为真值。

③在实验中,由于条件限制使测量不能重复,或者对测量准确度要求不高等原因,而对一个物理量只进行一次直接测量,这时就以这一次测量值作为近真值。

(2) 绝对误差和相对误差 测量值与真值之差 $\Delta X = |X - \bar{X}|$ 是以误差的绝对值来表示测量的误差,它反映测量值偏离真值的大小,具有和测量值相同的单位,通常称为绝对误差。本书所涉及的算术平均误差、标准误差都是指绝对误差。

绝对误差与真值的比值定义为相对误差,相对误差通常用百分率来表示,记做 E ,即:

$$E = \frac{\Delta X}{\bar{X}} \times 100\%$$

(3) 测量结果的表示 通常把测量结果表示为以下形式:

$$X = \bar{X} \pm \Delta X$$

$$E = \frac{\Delta X}{\bar{X}} \times 100\%$$

这样测量的结果及测量误差就完整地表示了。

4. 测量误差(绝对误差)的处理方法

(1) 直接测量值的误差 直接测量值的误差常用以下几种方法表示:

①算术平均误差(平均绝对误差):各次测量值 X_i 与算术平均值 $\bar{X}$ 的差值的绝对值 $\Delta X_i = |X_i - \bar{X}|$ 反映了各次测量的误差,我们把它叫做各次测量的绝对误差。各次测量的绝对误差的平均值定义为算术平均误差:

$$\overline{\Delta X} = \frac{\Delta X_1 + \Delta X_2 + \Delta X_3 + \cdots + \Delta X_k}{k} = \sum_{i=1}^k \frac{\Delta X_i}{k}$$

因为它是以误差的平均值表示测量值的绝对误差,故 $\overline{\Delta X}$ 又称为平均绝对误差,它表明被测物理量的平均值的误差范围,也就是说,被测物理量的值的大部分在 $\bar{X} + \overline{\Delta X}$ 和 $\bar{X} - \overline{\Delta X}$ 之间,因而测量结果应表示为 $X = \bar{X} \pm \overline{\Delta X}$ 。

②标准误差:求各次测量值 X_i 与算术平均值 $\bar{X}$ 的差,再取其平方的平均值,然后开方,称为标准误差,记作 σ ,即

$$\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^k \frac{(X_i - \bar{X})^2}{k}} = \sqrt{\sum_{i=1}^k \frac{(\Delta X_i)^2}{k}}$$

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 $\bar{X} \pm \sigma$ 。

对只进行一次直接测量的物理量,其误差可根据实际情况进行合理的估算。通常可

按仪器上标明的仪器误差作为单次测量的误差。如果没有注明,可取仪器最小刻度的一半作为单次测量的绝对误差。

当被测量已经有公认值(或理论值)时,绝对误差就取我们所得到的测量值与公认值(或理论值)之差的平均绝对值。

(2) 间接测量值的误差 在物理学实验中,大多数测量是间接测量。被测量值是由多个直接测量值通过一定的函数计算得出的结果。例如,要测一个均匀小球的密度 ρ ,先用游标卡尺测出它的直径 d ,利用体积公式算出其体积 $V = \frac{\pi}{6}d^3$,再用托盘天平测出它的质量 m ,根据密度公式求得其密度 $\rho = \frac{6m}{\pi d^3}$ 。直接测量值 d 、 m 的误差必然对间接测量值 ρ 的误差有所影响,这一问题可应用误差传递公式来进行处理。

设 A 、 B 为直接测量值,其测量值可表示为 $A = \bar{A} \pm \Delta A$, $B = \bar{B} \pm \Delta B$ 。 X 为间接测量值, $X = f(A, B)$ 。那么,间接测量误差结果的表示如下:

① 和的误差

若 $X = A + B$

则 $\bar{X} \pm \Delta X = (\bar{A} \pm \Delta A) + (\bar{B} \pm \Delta B) = (\bar{A} + \bar{B}) \pm (\Delta A + \Delta B)$

于是算术平均值为

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

平均绝对误差为

$$\Delta X = \Delta A + \Delta B$$

相对误差为

$$\frac{\Delta X}{\bar{X}} = \frac{\Delta A + \Delta B}{\bar{A} + \bar{B}}$$

② 差的误差

若 $X = A - B$

则 $\bar{X} \pm \Delta X = (\bar{A} \pm \Delta A) - (\bar{B} \pm \Delta B) = (\bar{A} - \bar{B}) \pm (\Delta A + \Delta B)$

于是算术平均值为

$$\bar{X} = \bar{A} - \bar{B}$$

考虑到可能产生的最大误差,差的平均绝对误差为

$$\Delta X = \Delta A + \Delta B$$

相对误差为

$$\frac{\Delta X}{\bar{X}} = \frac{\Delta A + \Delta B}{\bar{A} - \bar{B}}$$

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 $X = A \cdot B$

则 $\bar{X} \pm \Delta X = (\bar{A} \pm \Delta A) \cdot (\bar{B} \pm \Delta B) = \bar{A} \cdot \bar{B} \pm \bar{B} \cdot \Delta A \pm \bar{A} \cdot \Delta B \pm \Delta A \cdot \Delta B$

于是得算术平均值为

$$\bar{X} = \bar{A} \cdot \bar{B}$$

略去带有因子 $\Delta\bar{A} \cdot \Delta\bar{B}$ 的项 (因其值较小), 考虑到可能产生的最大误差, 则平均绝对误差为

$$\overline{\Delta X} = \bar{B} \cdot \overline{\Delta A} + \bar{A} \cdot \overline{\Delta B}$$

相对误差为

$$\frac{\overline{\Delta X}}{\bar{X}} = \frac{\overline{\Delta A}}{\bar{A}} + \frac{\overline{\Delta B}}{\bar{B}}$$

④商的误差

若

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

则

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

略去带有因子 $\overline{\Delta A} \cdot \overline{\Delta B}$ 和 $\overline{\Delta B}^2$ 的项, 考虑到可能产生的最大误差, 则算术平均值为

$$\bar{X} = \frac{\bar{A}}{\bar{B}}$$

平均绝对误差为

$$\overline{\Delta X} = \frac{\bar{B} \cdot \overline{\Delta A} + \bar{A} \cdot \overline{\Delta B}}{\bar{B}^2}$$

相对误差为

$$\frac{\overline{\Delta X}}{\bar{X}} = \frac{\overline{\Delta A}}{\bar{A}} + \frac{\overline{\Delta B}}{\bar{B}}$$

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方次与根的误差

由乘除运算的相对误差公式, 可以证明

若

$$X = A^n,$$

则

$$\frac{\overline{\Delta X}}{\bar{X}} = n \cdot \frac{\overline{\Delta A}}{\bar{A}}$$

若

$$X = A^{\frac{1}{n}},$$

则

$$\frac{\overline{\Delta X}}{\bar{X}} = \frac{1}{n} \cdot \frac{\overline{\Delta A}}{\bar{A}}$$

上述各种运算, 虽然是由 A 、 B 两个直接测量值所得的结果, 但可推广到有任意多个直接测量值计算间接误差的情况。从以上结论可看到, 当间接测量值的计算式中只含加减运算时, 先计算绝对误差, 后计算相对误差比较方便; 当计算式中含有乘、除、乘方或开方运算时, 先计算相对误差, 后计算绝对误差较为方便。

其他函数的误差传递公式, 我们不一一证明, 将常用公式列于表 0-1 中, 以备查阅。

表 0-1 常用误差计算公式

函数表达式	绝对误差 ΔN	相对误差 $\Delta N/\bar{N}$
$N=A+B$	$\Delta A+\Delta B$	$(\Delta A+\Delta B)/(\bar{A}+\bar{B})$
$N=A-B$	$\Delta A+\Delta B$	$(\Delta A+\Delta B)/(\bar{A}-\bar{B})$
$N=A \cdot B$	$\bar{B} \cdot \Delta A+\bar{A} \cdot \Delta B$	$\Delta A/\bar{A}+\Delta B/\bar{B}$
$N=A/B$	$(\bar{B} \cdot \Delta A+\bar{A} \cdot \Delta B)/\bar{B}^2$	$\Delta A/\bar{A}+\Delta B/\bar{B}$
$N=A^n$	$n \bar{A}^{n-1} \cdot \Delta A$	$n \cdot \Delta A/\bar{A}$
$N=A^{\frac{1}{n}}$	$\frac{1}{n} \bar{A}^{\frac{1}{n}-1} \cdot \Delta A$	$\frac{1}{n} \cdot \Delta A/\bar{A}$
$N=\sin A$	$(\cos \bar{A}) \cdot \Delta A$	$(\operatorname{ctg} \bar{A}) \cdot \Delta A$
$N=\cos A$	$(\sin \bar{A}) \cdot \Delta A$	$(\operatorname{tg} \bar{A}) \cdot \Delta A$
$N=\operatorname{tg} A$	$\Delta A/\cos^2 \bar{A}$	$2 \Delta A/\sin 2 \bar{A}$
$N=\operatorname{ctg} A$	$\Delta A/\sin^2 \bar{A}$	$2 \Delta A/\sin 2 \bar{A}$
$N=k A(k \text{ 为常数})$	$k \cdot \Delta A$	$\Delta A/\bar{A}$

(二) 有效数字及其运算法则

1. 测量仪器的精密度 对某一物理量，例如长度、时间、温度、压强、电流等进行测量，必须使用相应的仪器。但每种仪器由于其结构及生产技术条件等各方面因素的限制，都有一定的精密度。使用不同精密度的仪器，测量结果的精确度也就各不相同。

一般定义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。有的仪器有特殊标记，例如某一天平的感量是 0.01g，其精密度也就是 0.01g，此时就不能用最小分格来代表精密度。电子仪表的精密度是以级数标记的，例如某电表是 2.5 级，表示测量误差为 2.5%。级数越小，精密度就越高。

2. 有效数字的概念 仪器的精密度限制了测量的精确度。例如，我们用最小刻度为 mm 的米尺测量某一物体的长度，测得值是在 3.2cm 和 3.3cm 之间，3.2cm 为可靠数字，读数 3.2 和 3.3 之间的数字要由测量者估计得出，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，这个数字叫可疑数字。我们把测量结果的数字记录到开始可疑的那一位为止，组成这个数值的数字，即可靠数字加上可疑数字，称为测量结果的有效数字。

有效数字位数的多少取决于所使用仪器的精密度，不能随意增减。所以，有效数字不但指出了测量值的大小，还可以用以粗略地估计测量的精确程度。测量数据的有效数字愈多，结果愈为精确。

3. 有效数字的运算法则

(1) 加法与减法 对各数进行加减运算时，所得结果的有效数字位数，应与各数中