



全国普通高等医学院校药学类专业“十三五”规划教材

配套教材

(供药学类专业用)

# 物理化学

## 实验指导

□ 主编 高静 马丽英

中国医药科技出版社



全国普通高等医学院校药学类专业“十三五”规划教材配套教材

# 物理化学实验指导

(供药学类专业用)

---

主 编 高 静 马丽英

副主编 周庆华 邓月义

编 者 (以姓氏笔画为序)

马丽英 (滨州医学院)

邓月义 (桂林医学院)

刘 景 (济宁医学院)

江 欣 (佳木斯大学药学院)

牟 杰 (徐州医学院)

苑 娟 (河南中医学院)

周庆华 (黑龙江中医药大学)

高 静 (牡丹江医学院)

程 艳 (牡丹江医学院)



中国医药科技出版社

## 内 容 提 要

本书是全国普通高等医学院校药学类专业“十三五”规划教材《物理化学》实验配套教材。本书是针对普通高等医学院校药学类专业教学需要，保证药学教育教学适应医药卫生事业发展要求编写而成。本书共分三部分，包括绪论、实验内容、常用仪器使用，涉及物理化学基本操作技能的训练、基本理论知识的验证和一些综合性提高训练及数据处理技术等。实验原理简明、方法可靠、结果准确。

本书适合高等医学院校药学类各专业使用。

### 图书在版编目 (CIP) 数据

物理化学实验指导 / 高静, 马丽英主编. —北京: 中国医药科技出版社, 2016. 2

全国普通高等医学院校药学类专业“十三五”规划教材配套教材

ISBN 978-7-5067-8006-3

I. ①物… II. ①高… ②马… III. ①物理化学-化学实验-医学院校-教学参考资料 IV. ①O64-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 029646 号

美术编辑 陈君杞

版式设计 郭小平

出版 中国医药科技出版社

地址 北京市海淀区文慧园北路甲 22 号

邮编 100082

电话 发行: 010-62227427 邮购: 010-62236938

网址 [www.cmstp.com](http://www.cmstp.com)

规格 787×1092mm<sup>1</sup>/<sub>16</sub>

印张 6<sup>3</sup>/<sub>4</sub>

字数 148 千字

版次 2016 年 2 月第 1 版

印次 2016 年 2 月第 1 次印刷

印刷 三河市航远印刷有限公司

经销 全国各地新华书店

书号 ISBN 978-7-5067-8006-3

定价 18.00 元

版权所有 盗版必究

举报电话: 010-62228771

本社图书如存在印装质量问题请与本社联系调换

# 全国普通高等医学院校药学类专业“十三五”规划教材

## 出版说明

全国普通高等医学院校药学类专业“十三五”规划教材，是在深入贯彻教育部有关教育教学改革和我国医药卫生体制改革新精神，进一步落实《国家中长期教育改革和发展规划纲要》（2010-2020年）的形势下，结合教育部的专业培养目标和全国医学院校培养应用型、创新型药学专门人才的教学实际，在教育部、国家卫生和计划生育委员会、国家食品药品监督管理总局的支持下，由中国医药科技出版社组织全国近100所高等医学院校约400位具有丰富教学经验和较高学术水平的专家教授悉心编撰而成。本套教材的编写，注重理论知识与实践应用相结合、药学与医学知识相结合，强化培养学生的实践能力和创新能力，满足行业发展的需要。

本套教材主要特点如下：

### 1. 强化理论与实践相结合，满足培养应用型人才需求

针对培养医药卫生行业应用型药学人才的需求，本套教材克服以往教材重理论轻实践、重化工轻医学的不足，在介绍理论知识的同时，注重引入与药品生产、质检、使用、流通等相关的“实例分析/案例解析”内容，以培养学生理论联系实际的应用能力和分析问题、解决问题的能力，并做到理论知识深入浅出、难度适宜。

### 2. 切合医学院校教学实际，突显教材内容的针对性和适应性

本套教材的编者分别来自全国近100所高等医学院校教学、科研、医疗一线实践经验丰富、学术水平较高的专家教授，在编写教材过程中，编者们始终坚持从全国各医学院校药学教学和人才培养需求以及药学专业就业岗位的实际要求出发，从而保证教材内容具有较强的针对性、适应性和权威性。

### 3. 紧跟学科发展、适应行业规范要求，具有先进性和行业特色

教材内容既紧跟学科发展，及时吸收新知识，又体现国家药品标准 [《中国药典》（2015年版）]、药品管理相关法律法规及行业规范和2015年版《国家执业药师资格考试》（《大纲》、《指南》）的要求，同时做到专业课程教材内容与就业岗位的知识 and 能力要求相对接，满足药学教育教学适应医药卫生事业发展要求。

### 4. 创新编写模式，提升学习能力

在遵循“三基、五性、三特定”教材建设规律的基础上，在必设“实例分析/案例解析”

模块的同时，还引入“学习导引”“知识链接”“知识拓展”“练习题”（“思考题”）等编写模块，以增强教材内容的指导性、可读性和趣味性，培养学生学习的自觉性和主动性，提升学生学习能力。

### 5. 搭建在线学习平台，丰富教学资源、促进信息化教学

本套教材在编写出版纸质教材的同时，均免费为师生搭建与纸质教材相配套的“爱慕课”在线学习平台（含数字教材、教学课件、图片、视频、动画及练习题等），使教学资源更加丰富和多样化、立体化，更好地满足在线教学信息发布、师生答疑互动及学生在线测试等教学需求，提升教学管理水平，促进学生自主学习，为提高教育教学水平和质量提供支撑。

本套教材共计29门理论课程的主干教材和9门配套的实验指导教材，将于2016年1月由中国医药科技出版社出版发行。主要供全国普通高等医学院校药学类专业教学使用，也可供医药行业从业人员学习参考。

编写出版本套高质量的教材，得到了全国知名药学专家的精心指导，以及各有关院校领导和编者的大力支持，在此一并表示衷心感谢。希望本套教材的出版，将会受到广大师生的欢迎，对促进我国普通高等医学院校药学类专业教育教学改革和药学类专业人才培养作出积极贡献。希望广大师生在教学中积极使用本套教材，并提出宝贵意见，以便修订完善，共同打造精品教材。

中国医药科技出版社

2016年1月

# 全国普通高等医学院校药学类专业“十三五”规划教材

## 目 录

序号	教材名称	主编	ISBN
1	高等数学	艾国平 李宗学	978-7-5067-7894-7
2	物理学	章新友 白翠珍	978-7-5067-7902-9
3	物理化学	高 静 马丽英	978-7-5067-7903-6
4	无机化学	刘 君 张爱平	978-7-5067-7904-3
5	分析化学	高金波 吴 红	978-7-5067-7905-0
6	仪器分析	吕玉光	978-7-5067-7890-9
7	有机化学	赵正保 项光亚	978-7-5067-7906-7
8	人体解剖生理学	李富德 梅仁彪	978-7-5067-7895-4
9	微生物学与免疫学	张雄鹰	978-7-5067-7897-8
10	临床医学概论	高明奇 尹忠诚	978-7-5067-7898-5
11	生物化学	杨 红 郑晓珂	978-7-5067-7899-2
12	药理学	魏敏杰 周 红	978-7-5067-7900-5
13	临床药物治疗学	曹 霞 陈美娟	978-7-5067-7901-2
14	临床药理学	印晓星 张庆柱	978-7-5067-7889-3
15	药物毒理学	宋丽华	978-7-5067-7891-6
16	天然药物化学	阮汉利 张 宇	978-7-5067-7908-1
17	药物化学	孟繁浩 李柱来	978-7-5067-7907-4
18	药物分析	张振秋 马 宁	978-7-5067-7896-1
19	药用植物学	董诚明 王丽红	978-7-5067-7860-2
20	生药学	张东方 税丕先	978-7-5067-7861-9
21	药剂学	孟胜男 胡容峰	978-7-5067-7881-7
22	生物药剂学与药物动力学	张淑秋 王建新	978-7-5067-7882-4
23	药物制剂设备	王 沛	978-7-5067-7893-0
24	中医药学概要	周 晔 张金莲	978-7-5067-7883-1
25	药事管理学	田 侃 吕雄文	978-7-5067-7884-8
26	药物设计学	姜凤超	978-7-5067-7885-5
27	生物技术制药	冯美卿	978-7-5067-7886-2
28	波谱解析技术的应用	冯卫生	978-7-5067-7887-9
29	药学服务实务	许杜娟	978-7-5067-7888-6

注：29 门主干教材均配套有中国医药科技出版社“爱慕课”在线学习平台。



# 全国普通高等医学院校药学类专业“十三五”规划教材 配套教材书目

序号	教材名称	主编	ISBN
1	物理化学实验指导	高 静 马丽英	978-7-5067-8006-3
2	分析化学实验指导	高金波 吴 红	978-7-5067-7933-3
3	生物化学实验指导	杨 红	978-7-5067-7929-6
4	药理学实验指导	周 红 魏敏杰	978-7-5067-7931-9
5	药物化学实验指导	李柱来 孟繁浩	978-7-5067-7928-9
6	药物分析实验指导	张振秋 马 宁	978-7-5067-7927-2
7	仪器分析实验指导	余邦良	978-7-5067-7932-6
8	生药学实验指导	张东方 税丕先	978-7-5067-7930-2
9	药剂学实验指导	孟胜男 胡容峰	978-7-5067-7934-0

10	天然药物化学实验指导	李 静 王 静	978-7-5067-7935-7
11	中药鉴定学实验指导	王 静 王 静	978-7-5067-7936-4
12	中药炮制学实验指导	王 静 王 静	978-7-5067-7937-1
13	中药制剂学实验指导	王 静 王 静	978-7-5067-7938-8
14	中药调剂学实验指导	王 静 王 静	978-7-5067-7939-5
15	中药制剂学实验指导	王 静 王 静	978-7-5067-7940-2
16	中药制剂学实验指导	王 静 王 静	978-7-5067-7941-9
17	中药制剂学实验指导	王 静 王 静	978-7-5067-7942-6
18	中药制剂学实验指导	王 静 王 静	978-7-5067-7943-3
19	中药制剂学实验指导	王 静 王 静	978-7-5067-7944-0
20	中药制剂学实验指导	王 静 王 静	978-7-5067-7945-7
21	中药制剂学实验指导	王 静 王 静	978-7-5067-7946-4
22	中药制剂学实验指导	王 静 王 静	978-7-5067-7947-1
23	中药制剂学实验指导	王 静 王 静	978-7-5067-7948-8
24	中药制剂学实验指导	王 静 王 静	978-7-5067-7949-5
25	中药制剂学实验指导	王 静 王 静	978-7-5067-7950-2
26	中药制剂学实验指导	王 静 王 静	978-7-5067-7951-9
27	中药制剂学实验指导	王 静 王 静	978-7-5067-7952-6
28	中药制剂学实验指导	王 静 王 静	978-7-5067-7953-3
29	中药制剂学实验指导	王 静 王 静	978-7-5067-7954-0
30	中药制剂学实验指导	王 静 王 静	978-7-5067-7955-7

# 前言

PREFACE

物理化学实验是物理化学课程教学的重要组成部分。物理化学实验教学的任务就是通过进一步严格的、定量的实验,研究物质的物理化学性质和化学反应规律,使学生既要具备坚实的实验基础,又要具有初步的研究能力,实现学生由学习知识技能到进行科学研究的初步转变。

本教材是针对普通高等医学院校药学类专业教学需要,保证药学教育教学适应医药卫生事业发展要求编写而成。本书共分三部分,包括绪论、实验内容、常用仪器使用,涉及物理化学基本操作技能的训练、基本理论知识的验证和一些综合性提高训练及数据处理技术等。实验原理简明、方法可靠、结果准确。

本书共分三部分。第一部分为绪论,介绍了物理化学实验的学习要求、安全防护及实验中的误差和数据处理问题。第二部分为实验内容,内容涵盖化学热力学、化学动力学、电化学、相平衡、表面化学、胶体化学等方面,基本满足医药类院校的物理化学实验教学需要。每个实验内容分为实验目的、实验原理、仪器与药品、实验操作、数据处理、思考题等项目,既对实验所依据的基本理论作了简要介绍,又详细地叙述了实验步骤和操作方法,使学生阅读每个实验内容后,在教师指导下能独立地进行实验。第三部分为常用仪器使用,叙述了实验中用到的一些仪器的原理及使用方法,这对于提高学生适应现代实验设备与技术的能力,树立良好的科学作风具有帮助。书后附有附录,供学生查阅及参考。

全书由高静、马丽英主编,周庆华、邓月义副主编。牟杰、江欣、刘景、苑娟、程艳参加编写。其中第一、三部分由高静、马丽英编写;实验一、三、二十四由邓月义编写;实验二、五、十三、附录由程艳编写;实验四、十七、二十三由苑娟编写;实验六、十、十一由江欣编写;实验七、十九、二十二由刘景编写;实验八由高静编写;实验九、十二、二十一由周庆华编写;实验十四、十五、十六由马丽英编写;实



验十八、二十由牟杰编写。全书由高静、马丽英统稿、审稿。在编写过程中得到了各参编院校领导和各位同行的大力支持，在此致以诚挚的谢意。本教材供高等医学院校药学类各专业使用。

由于水平有限，书中不妥之处敬请广大师生和读者提出宝贵意见。

编者  
2015年10月

# 目录

CONTENTS

<b>第一部分 绪论</b> .....	1
一、物理化学实验课程的目的和要求 .....	1
二、物理化学实验中的安全防护 .....	2
三、物理化学实验中的误差 .....	3
四、物理化学实验中的数据处理 .....	7
<b>第二部分 实验内容</b> .....	10
实验一 燃烧热的测定 .....	10
实验二 中和热的测定 .....	15
实验三 溶解热的测定 .....	18
实验四 凝固点降低法测定摩尔质量 .....	22
实验五 液相反应平衡常数和反应热的测定 .....	25
实验六 配合物的组成及稳定常数的测定 .....	28
实验七 液体饱和蒸气压的测定 .....	31
实验八 完全互溶双液系的平衡相图 .....	34
实验九 部分互溶三组分系统相图的绘制 .....	37
实验十 电极制备及原电池电动势的测定 .....	40
实验十一 电导法测定难溶盐的溶解度 .....	43
实验十二 电导法测定弱电解质的电离平衡常数 .....	45
实验十三 丙酮碘化反应的速率常数和反应级数的测定 .....	47
实验十四 乙酸乙酯皂化反应速率常数的测定 .....	51
实验十五 蔗糖水解反应速率常数的测定 .....	54

实验十六	最大泡压法测定溶液的表面张力 .....	57
实验十七	固-液界面接触角的测量 .....	60
实验十八	电导法测定表面活性剂的临界胶束浓度 .....	62
实验十九	溶胶的制备、净化及性质 .....	64
实验二十	血清蛋白的醋酸纤维薄膜电泳 .....	67
实验二十一	乳状液的制备与性质 .....	70
实验二十二	黏度法测定大分子化合物的摩尔质量 .....	73
实验二十三	中药的离子透析 .....	77
实验二十四	药物的稳定性及有效期测定 .....	79
<b>第三部分 常用仪器使用 .....</b>		<b>81</b>
一、	温度计 .....	81
二、	电导率仪 .....	82
三、	旋光仪 .....	85
四、	DP-AF 饱和蒸气压测定装置 .....	88
五、	阿贝折射仪 .....	90
<b>附录 .....</b>		<b>94</b>
附录 I	国际单位制 (SI) 的基本单位 .....	94
附录 II	物理化学基本常数 .....	94
附录 III	一些物质的蒸气压 .....	95
附录 IV	不同温度下水的一些物理性质 .....	95
附录 V	一些有机化合物的密度与温度的关系 .....	96
附录 VI	一些有机化合物的标准摩尔燃烧焓 .....	97

# 第一部分 绪 论

物理化学实验是化学实验学科的一个重要分支。它是借助于物理学的原理、技术和仪器，借助于数学运算工具来研究物质的物理化学性质和化学反应规律的一门学科。物理化学实验是继无机化学实验、有机化学实验、分析化学实验之后必修的基础实验课程，它是化学领域中各分支所需的基本实验工具和研究方法的综合。因而物理化学实验在物理化学乃至整个化学学科中都占有十分重要的地位。

物理化学实验有两大特点。第一，物理化学实验主要借助于仪器对某一个物理化学性质进行测定，进而研究化学问题，使用仪器的能力在物理化学实验中是十分重要的。随着实验技术不断的更新和发展，实验仪器的性能朝着快速、准确、便捷的方向发展，因而物理化学实验的手段和方法也必然不断更新、不断发展。第二，物质的物理化学性质往往是通过间接方法测量的，测量结果常需利用数学的方法进行整理和综合运算，因此物理化学实验具有培养学生综合实验能力和科学研究能力的特点。

物理化学实验教学的任务就是通过严格的、定量的实验，研究物质的物理化学性质和化学反应规律，使学生既要具备坚实的实验基础，又要具有初步的研究能力，实现学生由学习基本技能到进行科学研究的初步转变。

## 一、物理化学实验课程的目的和要求

### (一) 物理化学实验课程的目的

(1) 掌握物理化学实验基本的研究方法、基本的实验操作技术以及常用实验仪器的使用方法。

(2) 通过严格实验训练，培养基本的科研素养，培养严谨求是的工作作风和科学态度。

(3) 加深对物理化学基本理论和基本概念的理解。

为提高学生的创新能力，物理化学实验教学在重视知识技能训练的同时，更要重视学生研究能力的培养，要把教学过程和研究过程很好地结合起来。通过包括热力学、动力学、相平衡、电化学和胶体等分支的典型实验，让学生掌握相应的研究方法、实验技术和仪器使用，通过实验操作训练这一中心环节，为培养能力打好基础。

### (二) 物理化学实验基本要求

1. 预习 实验前，学生应认真阅读实验教材，明确实验目的和要求，掌握实验所依据的基本原理和实验方法，明确实验数据及操作步骤。在此基础上，写出预习报告。预习报告应包括实验名称、实验依据的基本原理、实验所使用的仪器和药品、实验操作计划、实验注意事项、实验数据记录表格、提出预习中的问题等。

2. 实验操作 学生要严格遵守实验室的各项规章制度，严格执行操作规程。实验操作前

首先要检查仪器、药品、用品等是否齐全合格。若有问题，立即报告。然后洗涤器皿，按照实验要求安装和调试实验设施，按计划进行实验操作。在实验操作中要严格控制好实验条件，仔细观察和分析实验现象，客观、正确地记录原始数据。

做好实验记录，是从事科学研究的一项基础训练。原始数据要记录在预先准备好的专用笔记本上，书写要整齐，字迹要清楚，文字要简练明确，不能随意涂改数据。如经重复试验发现某个数据确有问题，应用笔轻轻地圈去，并注明原因。在实验过程中，实验者必须养成一边实验一边记录的习惯，不允许事后凭记忆补写或以零星纸条暂时记录再转抄。记录的内容应包括实验的全过程（如加入药品的数量、仪器装置）、每一步骤操作时间、内容及所观察到的现象。若操作步骤与教材不一致时，要按实际情况记录清楚，以作为总结讨论的依据。

学生在实验中要勤于动手和动脑，掌握实验要领和技能。实验过程是培养学生动手能力和科研素质的有效途径之一。实验结束后要整理和清洁实验所用的仪器、药品和其他用品，作好仪器使用记录，在实验指导教师审查实验数据、验收实验仪器和用品后，方能离开实验室。在实验中若有仪器和用品破损，应报告指导教师予以登记更换。

### 3. 实验报告 一般的实验报告应包括以下几项内容。

- (1) 实验目的 简要说明实验的目的。
- (2) 实验原理 简述实验的有关基本原理和主要化学反应方程式。
- (3) 实验步骤 简单、清晰、明了地表示实验步骤。切忌照抄书本。
- (4) 数据记录 要仔细详实，不允许主观臆造或抄袭他人数据，也不允许修改数据。
- (5) 数据处理 对实验现象加以简明解释，写出主要反应方程式，分标题小结并得出结论。数据计算要准确，图中实验点要清晰、准确。有效数字的位数要与实验的精度吻合。
- (6) 实验讨论 针对实验中遇到的问题，提出自己的见解。对于定量实验应分析实验误差产生的原因。

## 二、物理化学实验中的安全防护

化学实验必需的试剂与仪器常潜伏着诸如着火、爆炸、中毒、灼伤、触电等安全隐患，如何防止这些事故的发生以及发生事故以后又如何处置，这是每一个化学实验工作者必须具备的常识。现结合物理化学实验的特点做如下介绍。

**1. 安全用电** 违章用电常常造成人身伤亡、火灾、仪器损坏等严重事故。物理化学实验室使用电器较多，要特别注意用电安全。主要应注意以下几点。

- (1) 使用仪器前要根据仪器标牌上所提供的技术数据正确选用电源（如交流、直流、220V、高压电源、低压电源等）。接线要正确牢固。
- (2) 操作仪器时，双手要保持干燥，切忌用手触摸电源。
- (3) 要严格按照说明书使用仪器仪表，没有特殊情况，应避免在使用过程中拔插电源。
- (4) 安装和拆除接线的操作一定要在断电状态下进行，以防触电和电器短路。
- (5) 实验结束后，应关闭仪器电源，并且关闭仪器接线插座上的电源开关。
- (6) 如遇电线走火，应立即切断电源，用沙或二氧化碳灭火器灭火，切勿用水或导电的酸碱泡沫灭火器灭火。

**2. 安全使用化学试剂** 化学药品使用安全主要有防毒、防爆、防火、防灼伤四个方面。

(1) 防毒 化学试剂大多数存在不同程度的毒性，其毒性可以通过呼吸道、消化道、皮肤等进入体内。防毒的关键是尽量减少或杜绝直接接触化学试剂。实验前应了解所用药品的

毒性、性能和相关的防毒保护措施。操作有毒气体应在通风橱内进行。不要在实验室内吃食物，水杯、餐具等不得带入实验室，离开实验室时要洗手洗脸。

(2) 防爆 可燃性气体在实验室中达到爆炸极限浓度时，就可能引起爆炸，因而实验室内要尽量减少可燃性气体的挥发，同时要保持实验室良好的通风。当实验室内有可燃性气体时，应禁止使用明火，防止电火花产生。有些固体试剂如高价态氧化物、过氧化物等受热或撞击时容易引起爆炸，使用时应按要求进行操作。实验室使用高压容器如氧气、氮气、氢气、二氧化碳钢瓶，必须在教师指导下使用。

(3) 防火 实验室防火主要有两方面：第一，防止电器设备或带电系统着火，所以用电一定要按规定操作。第二，防止化学试剂着火。许多有机试剂属易燃品，使用这些试剂时要远离火源。实验室一旦发生火灾，应首先切断电源，使用灭火器或沙子灭火，千万不要用水浇。

(4) 防灼伤 强酸、强碱、强氧化剂等都会灼伤或腐蚀皮肤，尤其要防止进入眼睛，使用时除了有适当的防护措施外，一定要按规定操作。使用电炉、烘箱、干冰、液氮等时，要按照规定操作，避免高温灼伤和低温冻伤。

3. 防止环境污染 由于化学试剂大多具有一定的毒性，随意排放会造成环境污染。实验后的药品要尽量回收，不能回收的按要求进行处理，符合环保要求后才能排放。

由于汞在物理化学实验室中的应用很普遍，如气压计、水银温度计、U形汞压差计以及含汞电极等都要用到汞。汞蒸气的最大安全浓度为  $0.01 \times 10^{-6} \text{ kg/m}^3$ ，然而汞在常温下可挥发出的蒸气浓度是安全浓度的一百多倍。汞蒸气可通过呼吸或皮肤直接吸收而使人体中毒，所以防止汞污染尤为重要。

使用汞时，应注意不要将汞直接暴露于空气中，在U形汞压差计等汞面上应加水或其他液体，尽量避免汞蒸气外逸。盛汞的容器应有足够的机械强度，以免容器破裂。在实验中要尽量避免因水银温度计、U形汞压差计以及含汞电极的人为损坏而造成汞污染。若有汞掉落在桌上或地面上时，应用吸汞管尽可能地将汞珠收集起来，然后用硫磺覆盖在汞掉落的地方，摩擦使之生成  $\text{HgS}$  并清除。

### 三、物理化学实验中的误差

人们对某一客观事物测量时，是通过一系列步骤来获取物质信息的。但是在实际过程中，即使采用最可靠的手段，使用最精密的仪器，由技术很熟练的分析人员进行测定，也不可能得到准确的结果。同一个人在相同的条件下对同一样品进行多次测定，所得到的结果也不完全相同。这说明在实验过程中，误差是客观存在的。因此，应该了解分析过程中产生误差的原因及误差出现的规律，以便采取相应的措施减少误差，并对所得到的数据进行归纳、取舍等一系列分析处理，使测定的结果尽可能接近客观真实值。

#### (一) 误差分类

一般测量误差可分为系统误差、偶然误差和过失误差。

1. 系统误差 系统误差是由于某种特殊原因引起的误差。它对测量结果的影响是固定的或是有规律的。它使测量结果总是偏向一方，即总是偏大或偏小。测量次数的增加并不能使之消除。系统误差按产生原因可分类如下。

(1) 仪器误差 这是由于仪器结构上的缺陷引起的。如天平砝码不准确，气压计的真空度不够，仪器的精度不够等。



(2) 试剂误差 这是在化学实验中,所用试剂纯度不够而引起的误差。在某些情况下,试剂所含杂质可能给实验结果带来严重的影响。

(3) 方法误差 这是由于实验方法的理论依据有缺陷而引起的误差。例如,根据理想气体状态方程测定气体相对分子质量时,由于实际气体对理想气体的偏差,使所求得的相对分子质量有误差。只有用多种方法测得的同一数据一致时,才可认为方法误差已基本消除。如元素相对原子质量总是用多种方法测定而确定。

(4) 主观误差 这是由于观测者的习惯和特点引起的误差。如记录某一信号的时间总是提前或滞后,读取仪表时眼睛位置总是偏向一边,判定滴定终点的颜色不同等。

(5) 环境误差 这是由于实验过程中外界温度、压力、湿度等变化所引起的误差。例如,使用恒温槽可以减小由于环境温度变化所引起的误差,但事实上恒温槽的温度并不非常准确,要完全消除环境温度的影响是做不到的。同样,完全消除环境压强、湿度等影响也是不可能的。

系统误差影响了测量结果的准确程度。系统误差的数值有时比较大。只有消除系统误差的影响,才能有效地提高测量的精确度。采用几种不同的实验技术或采用不同的实验方法,或改变实验条件、调换仪器、提高化学试剂的纯度等,可确定有无系统误差的存在,并设法消除或使之减少。单凭一种方法所得的结果往往不是十分可靠的,只有不同的实验者用不同的方法和不同的仪器得到相符的数据,才能认为系统误差基本消除。

**2. 偶然误差** 在实验时,即使采用了最先进的仪器,选择了最恰当的方法,经过十分精细的测定消除了系统误差,但在同一条件下对一个物理量进行重复测量时,所测得的数据也不可能每次都相同,数据的末一位或末二位数字仍会有差异,即存在着一定的误差。这种误差称为偶然误差。偶然误差是由测量过程中一系列偶然因素(实验者不能严格控制的因素,如外界条件、实验者心理状态、仪器结构不稳定等)引起的。偶然误差在测量时不可能消除或估计出来,但是它服从统计规律。实践经验和概率论都证明,在相同条件下,多次测量同一个物理量,当测量次数足够多时,出现数值相等、符号相反的数值的几率近乎相等。通过增加测量次数,可使偶然误差减小到某种需要的程度。偶然误差决定测量结果的精密度。

**3. 过失误差** 过失误差是由于实验者的过失或错误引起的误差,如读数错误、计算错误、记录写错等。含有过失误差的测量值一律剔除。过失误差无规律可循,只要工作仔细,加强责任心就可以避免。防止过失误差还可以用校核法,即用别的方法或仪器对测量值进行近似测量,以判断正式测量的数据是否合理。

系统误差与偶然误差之间虽有着本质的不同,但在一定条件它们可以互相转化。实际上,我们常把某些具有复杂规律的系统误差看做偶然误差,采用统计的方法来处理。不少系统误差的出现均带有随机性。例如,在用天平称量时,每个砝码都存在着大小不等的系统误差。这种系统误差的综合效果,对每次称量是不相同的,它具有很大的偶然性。因此,在这种情况下,我们也可把这种系统误差作为偶然误差来处理。

对按准确度划分等级的仪器来说,同一级别的仪器中,每个仪器具有的系统误差是随机的,或大或小、或正或负,彼此都不一样。如一批容量瓶中,每个容量瓶的系统误差不一定相同,它们之间的差别是随机的,这种误差属于偶然误差。当使用其中某一个容量瓶时,这种随机的偶然误差又转化为系统误差。我们可通过校核,确定其系统误差的大小。如不校核或未被发现,仍然当偶然误差处理也是常有之事。有时,系统误差与偶然误差的区分也取决于时间因素。在短期间内是基本不变的系统误差,但时间一长,则可能出现随机变化的偶然误差。

## (二) 准确度与精密度

准确度是指测量值  $x$  与真实值  $\mu$  的接近程度, 两者差值越小, 则分析结果越准, 准确度的高低用误差来衡量。误差可分为绝对误差和相对误差两种。

绝对误差 = 测量值 ( $x$ ) - 真实值 ( $\mu$ )

$$\text{相对误差} = \frac{\text{绝对误差}}{\text{真实值}} = \frac{x - \mu}{\mu} \times 100\%$$

相对误差表示误差在真实值中所占的比例, 用其来比较在各种情况下测定结果的准确度比较合理。绝对误差和相对误差都有正值和负值, 正值表示分析结果偏高, 负值表示分析结果偏低。

但是在实际工作中, 真实值  $\mu$  常常是不知道的, 因此我们无法求得其准确度, 所以常用另一种方法—精密度来表示误差。这种方法是: 在一定的条件下, 对样品进行多次分析, 求出分析结果之间的一致程度。精密度的高低可用偏差来衡量。偏差是指个别分析结果与几次分析结果的平均值的差别。与误差相似, 偏差也有绝对偏差和相对偏差, 个别分析结果 ( $x_i$ ) 和平均值 ( $\bar{x}$ ) 的差为绝对偏差 ( $d_i$ ), 而绝对偏差在平均值中所占的百分率为相对偏差。

精密度是多次重复测量某一量值的离散度, 或称为重复性, 它是表征偶然误差大小的一个量。精密度通常用平均偏差、标准偏差或相对标准偏差来度量。

平均偏差: 各次测量偏差绝对值的平均值。

$$\bar{d} = \frac{\sum |d_i|}{n}$$

式中,  $d_i$  为测量值  $x_i$  与算术平均值  $\bar{x}$  之差;  $n$  为测量次数, 且  $\bar{x} = \frac{\sum x_i}{n}$ ,  $i=1, 2, \dots, n$ 。

相对平均偏差: 平均偏差与平均值的比值。

$$\text{相对平均偏差} = \frac{\bar{d}}{\bar{x}} \times 100\%$$

用数理统计方法处理数据时, 常用标准偏差和相对标准偏差来衡量测定结果的精密度。

标准偏差: 当测量次数  $n < 20$  时, 单次测量的标准偏差公式为

$$S = \sqrt{\frac{\sum d_i^2}{n-1}}$$

平均偏差的优点是计算简便, 但用这种偏差表示时, 可能会把质量不高的测量掩盖住。标准偏差对一组测量中的较大偏差或较小偏差感觉比较灵敏, 因此它是表示精密度的较好方法, 在近代科学中多采用标准偏差。

相对标准偏差: 
$$RSD = \frac{S}{\bar{x}} \times 100\%$$

$RSD$  越小表示多次测定所得结果之间越接近。

准确度和精密度的关系是: 精密度不高, 则准确度一定不高; 精密度高, 准确度不一定高。精密度是保证准确度的先决条件。

## (三) 测量结果的正确记录和有效数字

测量误差与正确记录测量结果紧密联系, 由于测得的物理量或多或少都有误差, 那么一个物理量的数值和数学上的数值就有着不同的意义。一个物理量的数值, 不仅能反映出其数值的大小, 而且还反映了实验方法和所用仪器的精确程度。如  $0.2 \sim 20.0^\circ\text{C}$  是用普通温度计测量, 而

0.02 ~ 20.00℃ 则是用 1/10 精确度的温度计测量。可见物理量的每一位数都是有实际意义的。有效数字的位数表明了测量精度，它包括测量中的几位可靠数字和最后估计的一位可疑数字。有效数字的概念在记录、计算数据时很重要。下面对其表示方法、运算规则作简单介绍。

### 1. 有效数字的表示方法

(1) 误差（绝对误差和相对误差）一般只有一位有效数字，至多不超过二位。

(2) 任何一物理量的数据，其有效数字的最后一位数在位数上与误差的最后一位对齐。如某物理量的测量值是 1.27，误差是 0.01，记为

1.27±0.01 （正确）

1.27±0.1 （错误）

1.27±0.001 （错误）

如某物理量的测量值是 156，误差是 2，记成

156±2 （正确）

156.5±2 或 156.5±2.0 （错误）

(3) 有效数字的位数是指从左边第一位不为零的数字至最后一位数字。与十进制位的变换无关，与小数点的位数无关。如下列四个数字中前三个都是四位有效数字：

1234

0.1234

0.0001234

1 234000

对中间二个数据，因表示小数位置的“0”不是有效数字，不难判断为四位有效数字，但最后一个数据其后面三个“0”究竟是表示有效数字，还是标志小数点位置，则无法判定。为了明确地表示有效数字，一般采用指数表示法，若把上面四个数字用指数表示为

$1.234 \times 10^3$

$1.234 \times 10^{-1}$

$1.234 \times 10^{-4}$

$1.234 \times 10^6$

1 2340 若写成  $1.234 \times 10^4$  则表示四位有效数字，若写成  $1.2340 \times 10^4$  则表示五位有效数字。若某个物理量的第一位数值等于或大于 8，则有效数字的总位数可以多算一位，例如 9.15 虽然只有三位有效数字，但在运算时可以当作四位有效数字。计算平均值时，若有 4 个数或超过 4 个数相平均，则平均值的有效数字位数可增加一位。

(4) 有效数字的位数越多，数值精确程度也越大，即相对误差就越小。如：

(1.35±0.01) 表示三位有效数字，相对误差 0.7%；

(1.3500±0.0001) 表示五位有效数字，相对误差 0.007%。

(5) 任何一次直接测量值都要记到仪器刻度的最小估计读数，即记到第一位可疑数字。如用滴定管时，最小刻度数为 0.1ml，它的最后一位估读数要记到 0.01ml 或 0.02ml。

### 2. 有效数字的运算规则

(1) 在舍弃不必要的数字时，应用“四舍六入五成双”原则，即：欲保留的末位有效数字的后面第一位数字为 4 或小于 4 时，则舍弃；若为 6 或大于 6 时，则在前一位（即有效数字的末位）加上 1；若等于 5 时，如前一位数字为奇数，则加上 1（即成双），如前一位数字为偶数，则舍弃不计。

(2) 在加减运算时，计算结果有效数字的末位的位置应与各项中绝对误差最大的一项相同，或者说保留各小数点后的数字位数应与最少者相同。例如 13.75、0.0084、1.642 三个数据相加，若各数末位都有 ±1 个单位的误差，则 13.75 的绝对误差 0.01 为最大的，也就是小数点后位数最少的是 13.75 这个数，所以计算结果有效数字的末位应在小数点后第二位。