



普通高等教育“十一五”国家级规划教材



全国高等农林院校“十一五”规划教材

物理化学实验

第二版

姚广伟 卜平宇 主编

 中国农业出版社

普通高等教育“十一五”国家级规划教材
全国高等农林院校“十一五”规划教材

物理化学实验

第二版

姚广伟 卜平宇 主编

中国农业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

物理化学实验 / 姚广伟, 卜平宇主编. —2 版. —
北京: 中国农业出版社, 2010. 8

普通高等教育“十一五”国家级规划教材. 全国高等
农林院校“十一五”规划教材

ISBN 978-7-109-14784-3

I. ①物… II. ①姚…②卜… III. ①物理化学-化
学实验-高等学校-教材 IV. ①O64-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 133818 号

中国农业出版社出版

(北京市朝阳区农展馆北路 2 号)

(邮政编码 100125)

策划编辑 曾丹霞

加工编辑 崇霞

北京中兴印刷有限公司印刷 新华书店北京发行所发行

2003 年 8 月第 1 版 2010 年 8 月第 2 版

2010 年 8 月第 2 版北京第 1 次印刷

开本: 720mm×960mm 1/16 印张: 14

字数: 245 千字

定价: 21.00 元

(凡本版图书出现印刷、装订错误, 请向出版社发行部调换)

内 容 简 介

本书是在第一版的基础上，结合各参编学校几年来的教学实践修订而成，力求语言简练，信息表达简洁清晰。

本书分为实验基础知识和实验技术、基本实验、常用实验仪器、附录 4 个部分，集实验教材和实验技能指导书为一体，实验部分为全书的主要内容。书中所选的 31 个实验，在保留原有物理化学实验的经典内容的同时，努力体现现代新技术的发展趋势，加强表面与胶体化学等方面的内容；充分考虑了普通高等农林院校的实验教学特色及学生的特点和需求，尽量突出物理化学及物理化学实验的较强的理论性和应用性的特点，着重于培养学生的动手能力和运用基础知识解决实际问题的能力。

本教材适用于普通高等院校化学专业和高等农林院校生命科学、食品科学、农药、生理生化、农业资源与环境等专业的学生，亦可供其他从事物理化学实验工作的有关人员及有关专业的研究生及生物类科技人员参考使用。

第二版编者名单

主 编 姚广伟 卜平宇
副主编 吕晓丽 唐树戈 王春娜
路慧哲 杜凤沛
编 者 (按姓氏笔画排序)

卜平宇 (沈阳农业大学)

王春娜 (北京农学院)

吕晓丽 (吉林农业大学)

牟 林 (沈阳农业大学)

杜凤沛 (中国农业大学)

李向冬 (中国农业大学)

苑嗣纯 (北京农学院)

郑其格 (沈阳农业大学)

郑燕英 (北京农学院)

姚广伟 (中国农业大学)

唐树戈 (沈阳农业大学)

梁大栋 (吉林农业大学)

路慧哲 (中国农业大学)

第一版编者名单

主 编 姚广伟 卜平宇

副主编 杜凤沛 吕晓丽 王春娜

编写者 (按姓氏笔画排序)

卜平宇 (沈阳农业大学)

王占英 (北京农学院)

王春娜 (北京农学院)

吕晓丽 (吉林农业大学)

杜凤沛 (中国农业大学)

李 俊 (辽宁大学)

李元珍 (北京农学院)

李向冬 (中国农业大学)

苑嗣纯 (北京农学院)

姚广伟 (中国农业大学)

唐树戈 (沈阳农业大学)

梁 丹 (北京农学院)

梁大栋 (吉林农业大学)

路慧哲 (中国农业大学)

第二版前言

本书第一版自 2003 年出版以来，被很多院校作为实验教材，受到广大师生的普遍好评，取得了较好的教学效果，2006 年被教育部评为普通高等教育“十一五”国家级规划教材。但经过几年的教学实践，编者发现教材中仍存在诸多不足，亟需改进。

编者以为修订的主旨除在内容上及时反映新技术和新知识的进展外，还应在对实验原理的描述上力求语言简练，在实验仪器使用操作和实验方案的描述上简明和条理清晰，使学生在在学习实践中和教师在教学中使用中能够快捷、明了和准确地获得需要的信息，提高效率。

此次修订在第一版的基础上，结合了各参编学校几年来的教学实践，对部分实验内容进行了完善和补充。教材结构仍保留第一版的风格，以力求反映物理化学实验研究方法的概貌，使学生在实验中可以掌握基本有用的实验技能和实验理论知识为修订宗旨。调整选编了 31 个基本实验及相关实验仪器的说明，兼顾考虑了各个学校物理化学实验教学的基本状况的差异，即可因教学的学时和具体实施不同而选取不同的实验数量和具体实验。对学生在实验原理和操作上可能存在的不明确和不清楚的问题，进行了明确的提示性描述，力求语言简练，表达信息简洁清晰。

此次修订过程中得到各编者所在院系和教务处的热情协助，并在出版过程中得到中国农业出版社的大力支持，编者在此表示由衷的感谢。

本次修订我们尽了最大努力，但限于编者水平有限，书中不妥之处在所难免，恳请有关专家和广大读者不吝指正，以便及时改进。

编者

2010 年 5 月

第一版前言

近年来，随着素质教育理念的建立，实验教学在素质教育中所起的作用越来越大。物理化学实验作为基础课向专业课过渡的一门化学课程，在近年来的教学改革中被广泛重视，国内外同仁进行了许多探索，提出了许多新的教育理念和新的实验，本教材就是在这样一个大环境下编写的。

本教材分为实验基础知识和实验技术、基本实验、常用实验仪器和附录 4 部分，选编了 32 个基本实验及其相应的实验常识和常用仪器的说明，并努力着重于计算机在实验进程中控制、数据采集和处理的应用。本教材力求反映物理化学实验研究方法的概貌，使学生在实验中可以掌握基本的实验技能和实验理论知识。

本教材的实验教学内容涉及热力学、电化学、动力学、表面和胶体化学、物质结构等学科知识，可用作普通高等院校化学专业和农业院校应用化学类、环境科学类、生物类、食品科学类及土壤科学类等专业的物理化学实验教材，亦可作为其他大专院校从事物理化学实验工作的有关人员的参考书。

本教材是全国高等农林院校“十五”规划统编教材，是中国农业大学（理科化学基地）、沈阳农业大学、吉林农业大学、北京农学院等院校从事物理化学实验教学的同仁们长期教学经验积累的成果，是以教学的实际状况、当代基本的实验技术和仪器以及学生学习的特点为主线而编写的，并吸收了兄弟院校的一些有益经验。根据素质教育和绿色化实验的理念，为了适应 21 世纪的教学改革，突出素质教育，培养有坚实实验精神和创新精神人才的需要，我们对原有的教材进行了重新整理和编写。除部分实验基本保持原有风貌外，在内容上有了较大的删减和增补，努力体现现代实验技术的应用。

考虑到各学校物理化学实验室的教学设备状况和实验教学的具体安排实施，因此在编写时尽量保持各个实验的相对独立和完整性，在实验数量和内容上力求保持物理化学实验课程体系的系统性，各院校可根据各自的教学状况和学时数选取适当的实验数量和实验具体内容。

由于我们水平有限，书中的问题和错误在所难免，敬请有关专家和广大读者批评指正，以便再版时予以修正。

编者

2003年5月

目 录

第二版前言

第一版前言

第一章 实验基础知识和实验技术	1
第一节 物理化学实验的目的和要求	1
第二节 物理化学实验的实验数据处理	2
一、实验误差分析简介	2
二、实验数据处理与表示方法	5
第三节 实验室安全知识	10
一、使用化学药品的安全防护	10
二、安全使用电器	11
三、高压气瓶的使用安全	11
四、有害辐射射线的防护	12
第四节 温度测量及控温技术	13
一、温标系统	13
二、普通温度计	17
三、水银温度计的校正	18
四、电阻式温度计	20
五、热电偶及其制作	21
六、程序控温仪	24
第五节 压力测量及真空技术	26
一、压力的测量	27
二、高压系统的建立和使用安全	28
三、真空技术	30
第六节 电学测量应用技术	32
一、电化学测量应用简介	32
二、标准电池	34
三、盐桥的制备	35

四、几种常用电极的制备	36
第二章 基本实验	40
实验 1 恒温水浴的组装及其性能测试	40
实验 2 液体饱和蒸气压的测定	44
实验 3 凝固点降低法测定摩尔质量	48
实验 4 积分溶解热的测定	52
实验 5 微分溶解热的测定	56
实验 6 氧弹燃烧热的测定	60
实验 7 中和热的测定	65
实验 8 溶液偏摩尔体积的测定	68
实验 9 双液系的气-液平衡相图	72
实验 10 配合物的组成及稳定常数的测定	75
实验 11 离子选择性电极的性能和应用	80
实验 12 溶液电导率的测定和应用	86
实验 13 原电池电动势和电池反应热力学函数的测定	90
实验 14 过氧化氢分解反应速率常数的测定	94
实验 15 甲基红的酸离解平衡常数的测定	99
实验 16 旋光法测定蔗糖转化反应的速率常数	103
实验 17 乙酸乙酯皂化反应速率常数的测定	108
实验 18 分光光度法测定蔗糖酶的米氏常数	111
实验 19 最大气泡压力差法测定溶液的表面张力	117
实验 20 固体矿物对溶液中负离子的吸附(比色法)	122
实验 21 固体在溶液中吸附的测定	125
实验 22 黏度法测定水溶性高聚物相对分子质量	127
实验 23 溶液体系的黏度特性	133
实验 24 固体颗粒的沉降分析	135
实验 25 溶胶的制备净化和稳定性测定	141
实验 26 电泳法测定胶体溶液的动电势 ξ	146
实验 27 乳状液的制备、鉴定与破乳	149
实验 28 差热分析	152
实验 29 溶液法测定极性分子的偶极矩	158
实验 30 磁化率的测定	164

实验 31 计算机控制的 B-Z 振荡反应	167
第三章 常用实验仪器	173
仪器 1 气压计和压力差测量仪	173
仪器 2 贝克曼温度计和电子温差测定仪	177
仪器 3 机械真空泵	179
仪器 4 阿贝折射仪	180
仪器 5 pH5-25B 型数字式酸度计	184
仪器 6 电导率仪	187
仪器 7 电位差计	189
仪器 8 旋光仪	191
仪器 9 722S 型分光光度计	194
仪器 10 古埃磁天平	196
仪器 11 PZ-A-5 型液体密度天平	197
附录 物理化学实验常用的数据表	200
附录 1 常用量的基本单位和导出单位 (SI 制)	200
附录 2 国际单位制用的十进制词冠	201
附录 3 常用基本物理常数	201
附录 4 压力单位之间的换算	202
附录 5 一些化合物的饱和蒸气压	202
附录 6 一些常见物质的凝固点降低常数 K_f	203
附录 7 水的绝对黏度 ($10^{-3} \text{ N} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}$)	203
附录 8 水和空气界面上的表面张力 ($10^{-3} \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$)	203
附录 9 不同温度下液体水的密度	204
附录 10 不同温度下水的饱和蒸气压 (Pa)	204
附录 11 水的折射率和介电常数	206
附录 12 不同温度和浓度时氯化钾溶液的电导率 ($\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$)	207
附录 13 1 mol 氯化钾溶于 200 mol 水中的积分溶解热	208
附录 14 作为表面吸附溶质时分子的截面积	208
附录 15 一些有机化合物的折射率	208
附录 16 常用冷却剂	209
主要参考文献	210

第一章 实验基础知识和实验技术

第一节 物理化学实验的目的和要求

物理化学是一门实验科学，它通过对实验现象的观察和测量，通过对实验数据的综合和分析，深入化学现象的本质，从而揭示化学反应的规律。化学科学发展的历史，就是在实验的基础上发展化学理论，又在理论的指导下进行新的化学实验探索的过程。实验是化学研究的基本手段，是化学工作者必需的最基本技能。

物理化学实验课是化学学科的基础实验课程之一，也是物理化学课程的重要组成部分。通过一些典型的和具有实用性的物理化学实验，使学生能够掌握物理化学实验的基本方法和技能，学会重要的物理化学性能的测定，强化理论学习效果，巩固和加强对物理化学原理的理解，提高学生灵活运用物理化学知识的能力，训练学生观察实验现象、正确记录实验数据、正确处理数据、分析和归纳实验结果的能力，培养严谨的科学态度和实事求是的工作作风。

为了达到上述目的，要求学生以严肃认真的态度，按照实验的要求做好每一个实验。培养一个良好的习惯是培养优秀的科学工作者的开始。

1. 实验预习 实验前要仔细阅读实验教材及教科书中的实验知识和实验仪器等有关内容，了解本实验的目的、基本理论和方法原理。简要草拟所用仪器的操作方法、实验安排和要测量的数据简表，写于专用的实验本或预习报告中。

2. 实验过程

(1) 进入实验室后先按仪器使用登记表核对仪器，如有短缺或损坏，应立即提出，以便补充或修理。

(2) 仪器装置和线路安装好后，须经教师检查无误后，方能接通电源进行实验，不得擅自实验或拆卸。

(3) 严格按仪器操作规程进行实验，不得随意改动。实验过程中如遇仪器损坏，应立即报告，检查原因，并登记损坏情况。

(4) 在实验过程中，要认真观察实验现象，记录数据，分析和思考问题。遇有异常现象，应和教师一起分析原因。保持实验室的整齐、清洁；注意安

全, 节约药品与实验用水; 遵守秩序, 禁止喧哗; 听从教师及实验室工作人员的指导。

(5) 实验完毕, 应将原始数据交教师审查认可。合格后再拆卸实验装置, 不合乎要求者需补做或重做。实验结束后切断电源, 整理仪器, 清洁实验台, 方可离开实验室。

(6) 课代表要安排值日生, 实验后打扫实验室, 按要求处理和倾倒废液, 拉电闸, 关闭门窗。

3. 实验报告 实验报告是整个物理化学实验中重要的环节。书写实验报告要注意研讨问题, 认真计算, 仔细填写各项数据; 字迹清楚, 文字通顺, 条理分明。处理数据应独立进行, 不得两人写一份报告。报告要真实反映实验结果和个人的主观认知, 反对伪造数据的不良行为。

物理化学实验报告一般应包括:

(1) 实验题目、日期、室温、大气压, 实验者和(或)同组实验者的姓名。

(2) 实验目的及原理。简要地说明实验原理、方法及研究对象。

(3) 实验仪器装置和试剂。用简图表示, 并注明各部分的名称和仪器型号, 列出主要的试剂。

(4) 实验步骤的要点。写出与指导书上不同之处或自己设计的步骤, 若与指导书上完全相同, 则写出摘要。

(5) 实验数据及数据处理。实验数据尽可能采用表格形式表示; 作图须用坐标图纸, 并标明坐标及图名; 绘制曲线要用曲线板。数据处理和作图应按第二节“物理化学实验的实验数据处理”中的规定进行。实验结果处理部分必须写出必要的计算公式及公式中已知常数的数值, 注意各数值所用的单位。

(6) 问题及讨论。一般包括对实验结果的误差分析, 对实验过程中异常现象的分析, 以及对实验方法、操作步骤、仪器装置的改进意见等。

实验报告一律采用统一的实验报告纸, 图纸应贴在报告纸上, 并附上原始记录的数据。

第二节 物理化学实验的实验数据处理

一、实验误差分析简介

在实验的测量过程中难免产生误差, 为了正确估计误差的程度, 以及消除误差的起因, 有必要对误差理论作简单介绍, 详细内容可参考相关资料。

1. 误差的来源 在物理化学实验中, 重复实验的结果各不相同, 一般是由于仪器的不完善, 观察者的不同特点以及不能完全使实验条件保持不变等原因所致, 即存在实验误差。实验误差可分为系统误差和随机误差。

(1) 系统误差。这种误差是由一定原因引起的, 它使测量结果恒定偏大或恒定偏小, 其数值或是基本不变, 或是按一定规律而变化。

系统误差并不因实验重复次数的增多而减小, 它总是以相仿的数值、同一符号(正值或负值)出现的, 根据产生误差的原因, 采取适当措施, 系统误差产生的不准确程度可以得到改善。

系统误差主要是由下列原因引起的:

① 仪器误差。由于仪器结构上的缺陷而产生的误差。如仪器示值部分的刻度划分得不够准确, 天平的两臂不等或重力传感器的误差, 仪器长久使用后由于机械磨损等引起测量误差等, 以及电子仪器的电路设计和信号处理转换的准确性等引起的测量误差。这类误差可以通过标准的方法来校正。

② 试剂误差。在化学实验中, 试剂中杂质的存在有时会给结果带来严重影响, 因此注意试剂的纯度是很重要的。

③ 个人误差。实验者往往在读取数据时, 习惯性地偏高或偏低, 鉴别颜色时偏深或偏浅。实验者经过一段时间的训练后, 这种误差可逐渐减小。

④ 方法误差。由于实验方法的基本理论在实验中难以完全实现, 或者理论依据的不完整或引用近似公式等所造成的误差。这类误差仅能随着理论和技术的发展而减小和消除。

(2) 随机误差(偶然误差)。即使系统误差已被校正, 但在同一条件下, 以同等仔细程度对某一个量进行重复观察时, 仍会发现测定值间存在或大或小的差异。

产生偶然误差的情况或原因很多, 譬如在估计仪器分度时读数的偶然偏大或偏小、控制滴定终点的指示剂颜色稍有不同、各种实验仪器的稳定性和重现性的扰动等。

随机误差是不可避免的, 对每个实验者来说, 偶然产生的误差是在变动的, 数值可大可小, 符号可正可负, 它服从概率定律, 即正误差(实验数据大于真值)与负误差(实验数据小于真值)出现的概率相同。因此随着实验次数的增多偶然误差的平均值逐渐趋于零。这也是重复实验测量的理论基础。

除去系统误差与偶然误差外, 有时还可能由于某些意外的原因产生误差, 例如测量数据时数值读错或记录错误, 外界条件突然改变(如电源电压的变动, 空气流动)等。如果在实验中发现这些误差, 便应及时进行纠正, 否则应该在对所得数据进行正确的实验数据处理过程中弃去。

2. 绝对误差与相对误差的理论意义和实际意义 例如重复测量某一量值得 $a_1, a_2, \dots, a_i, \dots, a_n$, 若其实际真值为 x , 则显然每一次测量中都含有单独测量的误差 Δa , 即

$$\Delta a_1 = a_1 - x, \Delta a_2 = a_2 - x, \dots, \Delta a_i = a_i - x, \dots, \Delta a_n = a_n - x$$

其一般通式形式则可写为

$$\Delta a_i = a_i - x$$

由于 x 的实际值并非已知, 所以不能求出 Δa_i 的实际值。为此, 在 n 次测量的情况下将各误差量相加并处理可得

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^n \Delta a_i &= \sum_{i=1}^n a_i - nx \\ x &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n a_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta a_i \end{aligned} \quad (1-2-1)$$

显然, 从理论上分析, 在正误差和负误差几率相等的情况下, 当 n 增加时, 等式右边第二项趋近于零, 因此可以把几次测量的算术平均值看做理论的实际值 x , 亦即

$$x = \lim_{n \rightarrow \infty} \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n a_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta a_i \right) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n a_i = \bar{a} \quad (1-2-2)$$

于是单独测量误差的计算公式写为

$$\Delta a_i = a_i - \bar{a} \quad (1-2-3)$$

Δa_i 称为绝对误差。绝对误差计算值可以为正, 也可以为负, 但它不能使我们看出整个实验的准确程度, 实验中很少用绝对误差来表示测量结果的好坏。

绝对误差的平均值可以用下式表示:

$$\Delta \bar{a} = \pm \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta a_i \quad (1-2-4)$$

式中, Δa_i 是表示误差的绝对值, 而前面的 \pm 表示正或负误差出现的几率相等。

相对误差是绝对误差的平均值与所测量的真值(算术平均值)之商, 即

$$\frac{\Delta \bar{a}}{\bar{a}} = \pm \frac{1}{n \cdot \bar{a}} \cdot \sum_{i=1}^n \Delta a_i \quad (1-2-5)$$

例如, 在测量 50 cm 长度时的绝对误差平均值为 ± 0.01 cm, 相当于 $0.01/50 = \pm 0.0002$, 即 0.02% 的相对误差。同样的测量精度下还是 ± 0.01 cm 的绝对误差, 在测量 1.00 cm 的长度时, 相对误差将为 $\pm 0.01(1\%)$, 为第一种情况的 50 倍。

由此看出, 相对误差更能反映测量结果的可靠性, 相对误差较绝对误差更

能鉴别实验的准确度。因此，相对误差常常应用于实验结果的讨论和评价。

二、实验数据处理与表示方法

1. 有效数据运算规则 0~9 统称为数字。一个数量的各个数字，除用来表示小数点位置的“0”（紧随小数点之后的0）之外，这个数量中只有它的最后一位数字是由估计而求得，其余的均为可靠的数字，则这个数量的各个数字的总个数便称为有效数字。

例如，0.145 有 3 位有效数字，36 005 有 5 位有效数字，0.000 205 0，0.205 0，2 050 都有 4 位有效数字，其中末位的 5 或 0 是测量估计值，是不可靠的数字。但若一个数量为 2 050，那么这后面的“0”就很难确定究竟是有效数字还是表示位数，所以习惯上用科学计数法来表示，以避免这种混淆。上面的数可写为 2.050×10^3 ，那么这就表示有效数字是 4 位，最后的 0 是可疑数值，但若写成 2.05×10^3 则表示有效数字是 3 位，最后的 5 是估计值。又例如，光在真空中传播速度如果写为 $2.997\ 92 \times 10^8$ 表示有效数字是 6 位，但若写成 299 792 000 就无法说明后面几个 0 的意义了。

物理化学实验中有效数字运算可遵循的方法如下：

(1) 舍去多余无用的有效数字时可以依据四舍五入的原则。

(2) 求几个数的和或差时，根据位数做比较，将所有有效数字中的可疑数字位数最大的作为标准，其他数值则在这一位数以后的数字全部四舍五入法取出，再进行加减。

例如， $13.65 + 0.008\ 2 + 1.632$ ，其中 13.65 中 5 的位数是 0.01，是所有可疑数字位数最大的，故应以 13.65 为标准计算，即 0.008 2 取 0.01，1.632 取 1.63。结果为 $13.65 + 0.01 + 1.63 = 15.29$ 。

(3) 在乘除计算中，可先按四舍五入法将各有效数字位数高的改为与运算的各数值中有效数字位数最少的一位相同，然后进行运算，结果的有效数字的位数也与此保留相同的位数。例如， $13.65 \times 0.008\ 2 \times 1.635 = 14 \times 0.008\ 2 \times 1.6 = 0.18$ 。

有时可多保留一位，按情况而定。

(4) 在用对数进行运算时，所用对数表的位数至少应与各数中有效数字最少的位数相等或多一位。

(5) 在复杂的计算中，在未得到最后数据之前，在中间各步应保留比原来有效数字多一位的保留方法，以免结果的累积误差太大，但最终结果应仍保持最少有效数字的位数。