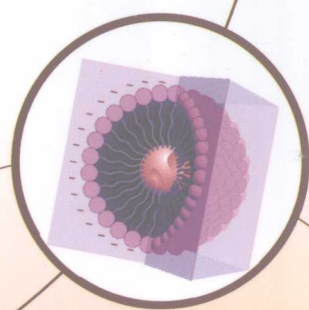


WULI HUAXUE SHIYAN

高等学校基础化学实验系列教材 >>>

# 物理化学实验

黄震 周子彦 孙典亭 主编



化学工业出版社

高等学校基础化学实验系列教材

# 物理化学实验

黄 震 周子彦 孙典亭 主编



化学工业出版社

· 北 京 ·

本书共分四章。第一章较为系统和详细地介绍了物理化学实验的目的要求、物理化学实验中的误差、数据的记录和处理等。第二章是实验部分,实验内容多选取多数院校沿用至今的经典实验,但是随着近年来物理化学实验教学方法和教学设备上的发展,结合多年的教学实践经验,有些实验内容做了必要的改进,使得教材既有科学性,又有实用性。实验内容的安排难易结合,既有传统的实验,也有反映现代物理化学新进展、新技术及与应用密切结合的实验,兼顾了基础性、应用性和综合性。第三章是实验技术,介绍了物理化学实验中一些常用的仪器和测量方法。在第四章收集了化学实验所需的常用数据表,便于查阅使用。

本书可作为综合性大学和高等师范院校的化学、化工类专业以及相关专业的本科生学习物理化学的实验教材,同时适合于高职、高专院校相关专业使用,也可供从事化学科学研究的人员、化学专业技术人员以及与化学密切相关的交叉学科的研究人员参考使用。

### 图书在版编目(CIP)数据

物理化学实验/黄震,周子彦,孙典亭主编. —北京:化学工业出版社,2009.9  
(高等学校基础化学实验系列教材)

ISBN 978-7-122-06354-0

I. 物… II. ①黄…②周…③孙… III. 物理化学-化学实验-高等学校-教材 IV. O64-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 127079 号

---

责任编辑:宋林肯 任海蓬  
责任校对:顾淑云

文字编辑:孙凤英  
装帧设计:史利平

---

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印 装:北京市兴顺印刷厂

787mm×1092mm 1/16 印张 8 字数 190 千字 2009 年 9 月北京第 1 版第 1 次印刷

---

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

---

定 价:16.00 元

版权所有 违者必究

## 高等学校基础化学实验系列教材编写指导委员会

主 任：黄家寅

副 主 任：李 悦 于先进 王亦军 董云会 曲建华

委 员：唐建国 于德爽 王培政 李 群 孙典亭

黄志刚 李月云 张 慧 赵剑英 汪学军

## 物理化学实验编写委员会

主 编：黄 震 周子彦 孙典亭

编 委：陈 悦 王凤云 艾 兵 成英之 胡艳芳

王亦军 孙秀玉 齐同喜 路 平

# 前 言

本书是以青岛大学和山东理工大学等高校为主编单位合作出版的高等学校基础化学实验系列教材中的一部。该系列教材的编写目的是为普通高等院校的化学、化工类专业以及近化学、非化学类专业本科生提供一套适用性强的实验教材。

随着物理化学实验技术的不断发展，当代科学技术在物理化学领域的广泛应用，物理化学实验教学内容、实验方法和手段的不断更新，特别是社会对人才培养的要求越来越高，原有的物理化学实验教材已远远不能满足和适应新世纪人才培养的需要。因此，我们根据教育部关于化学、应用化学、化工、医学、药学、冶金和材料等专业“物理化学”教学大纲中对“物理化学实验”部分的要求和教育部对国家级化学实验教学示范中心建设内容中对物理化学实验课的基本要求编写了本实验指导书。在编写过程中参考了国内外出版的同类教材，吸收了青岛大学和山东理工大学近年来物理化学实验教学和教改的经验和成果，还充分考虑了当前我国普通高等院校基础课教学现状和不同学科专业对“物理化学实验”的不同要求，对教学内容进行了“精选”、“整合”和“创新”，强调对学生的动手能力、创新思维、科学素养等综合素质的全面培养。《物理化学实验》是化学、化工、材料、医学检验、药学、食品和生物科学类专业学生的基础实验课，其目的是使学生准确掌握物理化学实验的基本技能，培养学生实事求是的科学态度以及良好的科学素质。

本书适用于化学化工类专业本科生的物理化学实验课教材，在内容上基本涵盖了物理化学的主要内容，主要由四章组成：第一章较为系统和详细地介绍了物理化学实验目的要求、物理化学实验中的误差问题、数据的记录和处理等问题。第二章是实验部分，涵盖了大学物理化学理论教学的主要内容，共 25 个实验项目，实验内容多选取多数院校沿用至今的经典实验，每个实验包括目的要求、预习要求、实验原理、仪器和试剂、实验步骤、数据记录和处理、思考与讨论 7 个部分，在一些实验中还附有实验数据记录格式，可供学生参照使用。第三章是实验技术，介绍了物理化学实验中一些常用的仪器和测量方法。本书在第四章收集化学实验所需的常用数据表，便于查阅使用。

本教材由黄震负责编写书中第一章及第二章中的部分内容；孙典亭编写第二章的实验一、七、十三、二十及第三、四章中的部分内容；陈悦负责编写第二章的实验六、十六、十七、二十四及第三章中的部分内容；周子彦负责编写第二章的实验三、四、十、十四以及第四章中的部分内容等；王风云负责编写第二章的实验九、十一、二十二、二十三等内容。全书由黄震担任主编，负责全书的内容筹划、审定和统稿，黄志刚副教授为本书编写顾问。

艾兵（山东理工大学）、成英之（山东理工大学）、胡艳芳、王亦军、孙秀玉（山东理工大学）、齐同喜（山东理工大学）、路平等人参与了实验方法探索、资料收集整理等工作。本教材在编写过程中，得到了青岛大学和山东理工大学有关领导和同行的大力支持，在此深表谢意。

由于编者水平所限，书中难免还有疏漏和不当之处，敬请读者批评指正。

编 者

2009 年 6 月于青岛大学

# 目 录

|                             |    |
|-----------------------------|----|
| 第一章 绪论 .....                | 1  |
| 一、物理化学实验的目的、要求和注意事项 .....   | 1  |
| 二、物理化学实验中的误差 .....          | 2  |
| 三、物理化学实验数据的记录和处理 .....      | 6  |
| 四、物理化学实验室安全知识 .....         | 8  |
| 第二章 实验部分 .....              | 12 |
| 实验一 恒温槽性能测试及液体黏度测定 .....    | 12 |
| 实验二 燃烧热的测定 .....            | 15 |
| 实验三 溶解热的测定 .....            | 20 |
| 实验四 中和热的测定 .....            | 24 |
| 实验五 凝固点降低法测摩尔质量 .....       | 26 |
| 实验六 液体饱和蒸气压的测定 .....        | 29 |
| 实验七 双液系气液平衡相图 .....         | 31 |
| 实验八 二组分金属相图的绘制 .....        | 34 |
| 实验九 部分互溶双液系的相互溶解度 .....     | 36 |
| 实验十 液相平衡 .....              | 37 |
| 实验十一 溶液偏摩尔体积的测定 .....       | 40 |
| 实验十二 电导的测定及应用 .....         | 43 |
| 实验十三 原电池电动势的测定 .....        | 46 |
| 实验十四 氯离子选择性电极的测试及应用 .....   | 49 |
| 实验十五 蔗糖水解速率常数的测定 .....      | 52 |
| 实验十六 乙酸乙酯皂化反应 .....         | 55 |
| 实验十七 丙酮碘化 .....             | 58 |
| 实验十八 氨基甲酸铵分解反应平衡常数的测定 ..... | 61 |
| 实验十九 B-Z 化学振荡反应 .....       | 64 |
| 实验二十 溶液表面张力的测定 .....        | 68 |
| 实验二十一 黏度法测定高聚物的摩尔质量 .....   | 71 |
| 实验二十二 溶胶的制备及电泳 .....        | 74 |
| 实验二十三 乳状液的制备和性质 .....       | 77 |
| 实验二十四 差热-热重分析 .....         | 79 |
| 实验二十五 偶极矩的测定——小电容仪 .....    | 81 |
| 第三章 实验技术 .....              | 85 |
| 一、温度的测量和控制 .....            | 85 |
| 二、折射率的测量和仪器 .....           | 90 |

|                            |            |
|----------------------------|------------|
| 三、旋光度的测量和旋光仪 .....         | 93         |
| 四、分光光度计 .....              | 96         |
| 五、电导率的测量和仪器 .....          | 100        |
| 六、原电池电动势的测量及仪器 .....       | 102        |
| <b>第四章 附录（常用数据表） .....</b> | <b>108</b> |
| <b>参考文献 .....</b>          | <b>119</b> |

# 第一章 绪 论

## 一、物理化学实验的目的、要求和注意事项

物理化学实验是继无机化学实验、分析化学实验和有机化学实验之后的一门基础化学实验课。物理化学实验综合了化学领域中各分支所需的基本研究工具和方法，通过实验的手段，研究物质的物理化学性质以及这些物理化学性质与化学反应之间的关系，从而形成规律的认识，使学生掌握物理化学的有关理论、实验方法和实验技术，以培养学生分析问题和解决问题的能力。

物理化学实验的目的是使学生了解物理化学实验的基本实验方法和实验技术，学会通用仪器的操作，培养学生的动手能力；通过实验操作、现象观察和数据处理，锻炼学生分析问题、解决问题的能力；加深对物理化学基本原理的理解，给学生提供理论联系实际和理论应用于实践的机会；培养学生勤奋学习、求真、求实、勤俭节约的优良品德和科学精神。

实验过程中的要求包括以下几个方面。

### 1. 作好预习

学生在进实验室之前必须仔细阅读实验书中有关的实验及基础知识，明确本次实验中测定什么量，最终求算什么量，用什么实验方法，使用什么仪器，控制什么实验条件，在此基础上写出实验预习报告。预习报告内容应包括：实验目的和原理，简要的操作步骤，并设计一个原始数据记录表。

进入实验室后不要急于动手做实验，首先要查对仪器，看是否完好，发现问题及时向指导教师提出，然后对照仪器进一步预习，并接受教师的提问、讲解，在教师指导下做好实验准备工作。

### 2. 实验操作及原始数据的记录

经指导教师同意方可接通仪器电源进行实验。仪器的使用要严格按照操作规程进行，不可盲动；对于实验操作步骤，通过预习做到心中有数，实验过程中要仔细观察实验现象，发现异常现象，应仔细查明原因，或请教指导教师帮助分析处理。

实验结果必须经教师检查，数据不合格的应及时返工重做，直至获得满意结果，实验数据应随时记录在预习笔记本上，记录数据要实事求是，详细准确，且注意整洁清楚，不得任意涂改；如果发现某个数据有问题应舍弃时，可用笔轻轻圈去。数据记录应采用表格形式，字迹要整齐清楚。保持良好的记录习惯是物理化学实验的基本要求之一。

学生应严格按照仪器操作规程使用仪器，实验过程中应保持台面的整洁并遵守实验室的有关规定。实验完毕后，应将实验仪器及台面及时清理干净，填写仪器使用记录，经指导教师同意后，方可离开实验室。

### 3. 实验报告

学生应独立完成实验报告，并在下次实验前及时送指导教师批阅。实验报告的内容包括：实验目的及原理、实验装置简图、实验条件（室温、大气压、药品纯度、仪器精度等）、原始实验数据、数据处理及作图、结果讨论和思考题。数据处理应有原始数据记录表和计算结果表示表，需要计算的数据必须列出算式，对于多组数据，可列出其中一组数据的算式。

作图时必须按本绪论中数据处理部分所要求的去做,实验报告的数据处理中不仅包括表格、作图和计算,还应有必要的文字叙述。例如:“所得数据列入 $\times\times$ 表”,“由表中数据作 $\times\times\sim\times\times$ 图”等,以便使写出的报告更加清晰、明了,逻辑性强,便于批阅和留作以后参考。结果讨论应包括对实验现象的分析解释,查阅文献的情况,对实验结果误差的定性分析或定量计算,对实验的改进意见和做实验的心得体会等。

#### 4. 实验室规则

① 实验时应遵守操作规则,遵守一切安全措施,保证实验安全进行。

② 遵守纪律,不迟到,不早退,保持室内安静,不大声谈笑,不到处乱走,不许在实验室内嬉闹及恶作剧。

③ 使用水、电、煤气、药品试剂等都应本着节约原则。

④ 未经老师允许不得乱动精密仪器,使用时要爱护仪器,如发现仪器损坏,立即报告指导教师并追查原因。

⑤ 随时注意室内的整洁卫生,火柴杆、纸张等废物只能丢入废物缸内,不能随地乱丢,更不能丢入水槽,以免堵塞。实验完毕将玻璃仪器洗净,把实验桌打扫干净,公用仪器、试剂药品等都整理整齐。

⑥ 实验时要集中注意力,认真操作,仔细观察,积极思考,实验数据要及时如实详细地记在预习报告本上,不得涂改和伪造,如有记错,可在原数据上画一杠,再在旁边记下正确值。

⑦ 实验结束后,由同学轮流值日,负责打扫整理实验室,检查水、煤气、门窗是否关好,电闸是否拉掉,以保证实验室的安全。

实验室规则是人们长期从事化学实验工作的总结,它是保持良好环境和工作秩序,防止意外事故,做好实验的重要前提,也是培养学生优良素质的重要措施。

## 二、物理化学实验中的误差

由于实验方法的可靠程度,所用仪器的精密度和实验者感官的限度等各方面条件的限制,使得一切测量均带有误差,即测量值与真值之差。因此,必须对误差产生的原因及其规律进行研究,方可在合理的人力、物力支出条件下,获得可靠的实验结果,再通过实验数据的列表、作图、建立数学关系式等处理步骤,就可使实验结果变为有参考价值的资料,这在科学研究中是必不可少的。

### 1. 误差的分类

按其性质可分为如下三种。

#### (1) 系统误差

在相同条件下,多次测量同一量时,误差的绝对值和符号保持恒定,或在条件改变时,按某一确定规律变化的误差。系统误差产生的原因有以下几个。

① 实验方法方面的缺陷。例如使用了近似公式。

② 仪器药品不良引起。如电表零点偏差,温度计刻度不准,药品纯度不高等。

③ 操作者的不良习惯。如观察视线偏高或偏低。

改变实验条件可以发现系统误差的存在,针对产生原因,可采取措施将其消除。

#### (2) 过失误差(或粗差)

这是一种明显歪曲实验结果的误差。它无规律可循,是由操作者读错、记错所致,只要加强责任心,此类误差可以避免。发现有此种误差产生,所得数据应予以剔除。

### (3) 偶然误差 (随机误差)

在相同条件下多次测量同一量时, 误差的绝对值时大时小, 符号时正时负, 但随测量次数的增加, 其平均值趋近于零, 即具有抵偿性, 此类误差称为偶然误差。它产生的原因并不确定, 一般是由环境条件的改变 (如大气压、温度的波动)、操作者感官分辨能力的限制 (如对仪器最小分度以内的读数难以读准确等) 所致。

误差的表达方法有三种。

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

② 标准误差 (或称均方根误差)  $\sigma = \sqrt{\frac{\sum d_i^2}{n-1}}$ 。

③ 偶然误差  $P=0.675\sigma$ 。

一般常用前面两种。为了表达测量的精度, 又有绝对误差、相对误差两种表达方法。

#### (1) 绝对误差

它表示了测量值与真值的接近程度, 即测量的准确度。其表示法:  $\bar{x} \pm \delta$  或  $\bar{x} \pm \sigma$ , 其中,  $\delta$  和  $\sigma$  分别为平均误差和标准误差, 一般以一位数字 (最多两位) 表示。

#### (2) 相对误差

它表示测量值的精密度, 即各次测量值相互靠近的程度。其表示法如下。

$$\text{平均相对误差} = \pm \frac{\delta}{\bar{x}} \times 100\%$$

$$\text{标准相对误差} = \pm \frac{\sigma}{\bar{x}} \times 100\%$$

### 2. 偶然误差的统计规律和可疑值的舍弃

偶然误差符合正态分布规律, 即正、负误差具有对称性。所以, 只要测量次数足够多, 在消除了系统误差和粗差的前提下, 测量值的算术平均值趋近于真值。

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \bar{x} = x_{\text{真}}$$

但是, 一般测量次数不可能有无限多次, 所以一般测量值的算术平均值也不等于真值。于是人们又常把测量值与算术平均值之差称为偏差, 常与误差混用。

如果以误差出现次数  $N$  对标准误差的数值  $\sigma$  作图, 得一对称曲线。统计结果表明测量结果的偏差大于  $3\sigma$  的概率不大于  $0.3\%$ 。因此根据小概率定理, 凡误差大于  $3\sigma$  的点, 均可以作为粗差剔除。严格地说, 这是指测量达到一百次以上时方可如此处理, 可粗略地用于 15 次以上的测量。对于 10~15 次时可用  $2\sigma$ , 若测量次数再少, 应酌情递减。

### 3. 误差传递——间接测量结果的误差计算

测量分为直接测量和间接测量两种, 一切简单易得的量均可直接测量出, 如用米尺量物体的长度, 用温度计测量体系的温度等。对于较复杂不易直接测得的量, 可通过直接测定简单量, 而后按照一定的函数关系将它们计算出来。例如测量量热计温度变化  $\Delta T$  和样品重  $m$ , 代入公式  $\Delta H = C\Delta T \frac{M}{m}$ , 就可求出溶解热  $\Delta H$ , 于是直接测量的  $T$ 、 $m$  的误差, 就会传

递给  $\Delta H$ 。通过间接测量结果误差的求算，可以知道哪个直接测量值的误差对间接测量结果影响最大，从而可以有针对性地提高测量仪器的精度，获得好的结果。

(1) 间接测量结果误差的计算

设有函数  $u=F(x,y)$ ，其中  $x, y$  为可以直接测量的量。则

$$du=\left(\frac{\partial F}{\partial x}\right)_y dx+\left(\frac{\partial F}{\partial y}\right)_x dy$$

此为误差传递的基本公式。

(2) 间接测量结果的标准误差计算

若  $u=F(x,y)$ ，则函数  $u$  的标准误差为

$$\sigma_u=\sqrt{\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)^2\sigma_x^2+\left(\frac{\partial u}{\partial y}\right)^2\sigma_y^2}$$

部分函数的标准误差列入表 1-1。

表 1-1 部分函数的标准误差

| 函数关系            | 绝对误差                                                        | 相对误差                                                      |
|-----------------|-------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|
| $u=x\pm y$      | $\pm\sqrt{\sigma_x^2+\sigma_y^2}$                           | $\pm\frac{1}{ x\pm y }\sqrt{\sigma_x^2+\sigma_y^2}$       |
| $u=xy$          | $\pm\sqrt{y^2\sigma_x^2+x^2\sigma_y^2}$                     | $\pm\sqrt{\frac{\sigma_x^2}{x^2}+\frac{\sigma_y^2}{y^2}}$ |
| $u=\frac{x}{y}$ | $\pm\frac{1}{y}\sqrt{\sigma_x^2+\frac{x^2}{y^2}\sigma_y^2}$ | $\pm\sqrt{\frac{\sigma_x^2}{x^2}+\frac{\sigma_y^2}{y^2}}$ |
| $u=x^n$         | $\pm nx^{n-1}\sigma_x^2$                                    | $\pm\frac{n}{x}\sigma_x$                                  |
| $u=\ln x$       | $\pm\frac{\sigma_x}{x}$                                     | $\pm\frac{\sigma_x}{x\ln x}$                              |

4. 测量的准确度

准确度是指测得值与真值之间的符合程度。准确度的高低常以误差的大小来衡量。即误差越小，准确度越高；误差越大，准确度越低。准确度与精密度的区别如下。

① 一个精密度很好的测量结果，其准确度不一定很好；但准确度好的结果却必须精密度很好。

② 通常可用准确度来表示某一测量系统误差的大小，系统误差小的实验测量称为准确度高的测量；同样，可用精密度来表示某一测量的偶然误差的大小，偶然误差小的实验测量称为精密度高的测量。

5. 可靠程度的估计

一般说来，在基础物理化学实验中，通常只测量一个  $x_i$ ，因此，不能得到测量可靠值的可靠程度（因为： $n\geq 5$  时才能得到可靠性的可靠程度），但可按所用仪器的规格，估计测量值的可靠程度。下面是物理化学实验常用仪器的估计误差。

(1) 容量仪器（用平均误差表示）

|      |                      |                      |
|------|----------------------|----------------------|
| 移液管  | 一等                   | 二等                   |
| 50mL | $\pm 0.05\text{mL}$  | $\pm 0.12\text{mL}$  |
| 25mL | $\pm 0.04\text{mL}$  | $\pm 0.10\text{mL}$  |
| 10mL | $\pm 0.02\text{mL}$  | $\pm 0.04\text{mL}$  |
| 5mL  | $\pm 0.01\text{mL}$  | $\pm 0.03\text{mL}$  |
| 2mL  | $\pm 0.006\text{mL}$ | $\pm 0.015\text{mL}$ |

| 容量瓶    | 一等                  | 二等                  |
|--------|---------------------|---------------------|
| 1000mL | $\pm 0.30\text{mL}$ | $\pm 0.60\text{mL}$ |
| 500mL  | $\pm 0.15\text{mL}$ | $\pm 0.30\text{mL}$ |
| 250mL  | $\pm 0.10\text{mL}$ | $\pm 0.20\text{mL}$ |
| 100mL  | $\pm 0.10\text{mL}$ | $\pm 0.20\text{mL}$ |
| 50mL   | $\pm 0.05\text{mL}$ | $\pm 0.10\text{mL}$ |
| 25mL   | $\pm 0.03\text{mL}$ | $\pm 0.06\text{mL}$ |

## (2) 重量仪器 (用平均误差表示)

|              |                                                  |
|--------------|--------------------------------------------------|
| 分析天平         | 一等 $0.0001$<br>二等 $0.0004$                       |
| 工业天平 (或物理天平) | $0.001$                                          |
| 台秤           | 称量 $1\text{kg}$ $0.1$<br>称量 $100\text{g}$ $0.01$ |

## (3) 温度计

一般取其最小分度值的  $1/10$  或  $1/5$  作为其精密度。例如  $1^\circ\text{C}$  刻度的温度计的精密度估读到  $\pm 0.2^\circ\text{C}$ ,  $1/10^\circ\text{C}$  刻度的温度计的精密度估读到  $\pm 0.02^\circ\text{C}$ 。

## (4) 电表

新的电表, 可按其说明书所述准确度来估计, 例如 1.0 级电表的准确度为其最大量程值的  $10\%$ ; 0.5 级电表的准确度为其最大量程值的  $5\%$ 。电表的精密度不可贸然认为就是其最小分度值的  $1/5$  或  $1/10$ 。电表测量结果的精密度最好每次测定。

## 6. 怎样使测量结果达到足够的精确度

综上所述, 已知测定某一物理量时, 为使测量结果达到足够的精确度, 应按下列次序进行。

### (1) 正确选用仪器

按实验要求, 确定所用仪器的规格, 仪器的精密度不能低于实验结果要求的精密度, 但也不必过优于实验结果的精密度。

### (2) 校正实验仪器和药品的系统误差

即校正仪器、纯化药品并选用标准样品测量。

### (3) 减小测量过程中的偶然误差

测定某种物理量时, 要进行多次连续重复测量 (必须在相同的实验条件下), 直至测量结果围绕某一数值上下不规则变动时, 取这些测量数值的算术平均值。

### (4) 进一步校正系统误差

当测量结果达不到要求的精密度, 且确认测量误差为系统误差时, 应进一步探索, 反复实验, 以致可以否定原来的标准值。

## 7. 有效数字

当对一个测量的量进行记录时, 所记数字的位数应与仪器的精密度相符合, 即所记数字的最后一位为仪器最小刻度以内的估计值, 称为可疑值, 其他几位为准确值, 这样一个数字称为有效数字, 它的位数不可随意增减。例如, 普通  $50\text{mL}$  的滴定管, 最小刻度为  $0.1\text{mL}$ , 则记录  $26.55$  是合理的; 记录  $26.5$  和  $26.556$  都是错误的, 因为它们分别缩小和夸大了仪器的精密度。为了方便地表达有效数字位数, 一般用科学记数法记录数字, 即用一个带小数的

个位数乘以 10 的相当幂次表示。例如 0.000567 可写为  $5.67 \times 10^{-4}$ ，有效数字为三位；10680 可写为  $1.0680 \times 10^4$ ，有效数字是五位，如此等等。用以表达小数点位置的零不计入有效数字位数。

在间接测量中，须通过一定公式将直接测量值进行运算，运算中对有效数字位数的取舍应遵循如下规则。

① 误差一般只取一位有效数字，最多两位。

② 有效数字的位数越多，数值的精确度也越大，相对误差越小。

a.  $(1.35 \pm 0.01)\text{m}$ ，三位有效数字，相对误差 0.7%。

b.  $(1.3500 \pm 0.0001)\text{m}$ ，五位有效数字，相对误差 0.007%。

③ 若第一位的数值等于或大于 8，则有效数字的总位数可多算一位，如 9.23 虽然只有三位，但在运算时，可以看作四位。

④ 运算中舍弃过多不定数字时，应用“4 舍 6 入，逢 5 尾留双”的法则，例如有下列两个数值：9.435、4.685，整化为三位数，根据上述法则，整化后的数值为 9.44 与 4.68。

⑤ 在加减运算中，各数值小数点后所取的位数，以其中小数点后位数最少者为准。例如：

$$56.38 + 17.889 + 21.6 = 56.4 + 17.9 + 21.6 = 95.9$$

⑥ 在乘除运算中，各数保留的有效数字，应以其中有效数字最少者为准。例如：

$$1.436 \times 0.020568 \div 85$$

其中 85 的有效数字最少，由于首位是 8，所以可以看成三位有效数字，其余两个数值，也应保留三位，最后结果也只保留三位有效数字。例如：

$$\frac{1.44 \times 0.0206}{85} = 3.49 \times 10^{-4}$$

⑦ 在乘方或开方运算中，结果可多保留一位。

⑧ 对数运算时，对数中的首数不是有效数字，对数尾数的位数，应与各数值的有效数字相当。例如：

$$[\text{H}^+] = 7.6 \times 10^{-4}$$

$$\text{pH} = 3.12$$

$$K = 3.4 \times 10^9$$

$$\lg K = 9.53$$

⑨ 算式中，常数  $\pi$ 、 $e$  及乘子 2 和某些取自手册的常数，如阿伏伽德罗常数、普朗克常数等，不受上述规则限制，其位数按实际需要取舍。

### 三、物理化学实验数据的记录和处理

物理化学实验数据的表示法主要有如下三种方法：列表法、作图法和数学方程式法。

#### 1. 列表法

将实验数据列成表格，排列整齐，使人一目了然。这是数据处理中最简单的方法，列表时应注意以下几点。

① 表格要有名称。

② 每行（或列）的开头一栏都要列出物理量的名称和单位，并把二者表示为相除的形式。因为物理量的符号本身是带有单位的，除以它的单位，即等于表中的纯数字。

③ 数字要排列整齐，小数点要对齐，公共的乘方因子应写在开头一栏并为与物理量符号相乘的形式，且为异号。

④ 表格中表达的数据顺序为：由左到右，由自变量到因变量，可以将原始数据和处理结果列在同一表中，但应以一组数据为例，在表格下面列出算式，写出计算过程。

## 2. 作图法

作图法可更形象地表达出数据的特点，如极大值、极小值、拐点等，并可进一步用图解求积分、微分、外推、内插值。作图应注意如下几点。

① 图要有图名。例如“ $\ln K_p - 1/T$  图”、“ $V-t$  图”等。

② 要用正规坐标纸作图。

③ 在轴旁须注明变量的名称和单位（二者表示为相除的形式），10 的幂次以相乘的形式写在变量旁，并为异号。

④ 适当选择坐标比例，以表达出全部有效数字为准。如果作直线，应正确选择比例，使直线呈  $45^\circ$  倾斜为好。

⑤ 坐标原点不一定选在零，应使所作直线与曲线均匀地分布于图面中。在两条坐标轴上每隔 1cm 或 2cm 均匀地标上所代表的数值，而图中所描各点的具体坐标值不必标出。

⑥ 描点时，应用细铅笔将所描的点准确而清晰地标在其位置上，可用  $\circ$ 、 $\triangle$ 、 $\square$ 、 $\times$  等符号表示，符号总面积表示了实验数据误差的大小，所以不应超过 1mm 格。同一图中表示不同曲线时，要用不同的符号描点，以示区别。

⑦ 作曲线时，应尽量多地通过所描的点，但不要强行通过每一个点。对于不能通过的点，应使其等量地分布于曲线两边，且两边各点到曲线的距离之平方和要尽可能相等。描出的曲线应平滑均匀。

⑧ 图解微分 图解微分的关键是作曲线的切线，而后求出切线的斜率值，即图解微分值。作曲线的切线可用如下两种方法。

a. 镜像法 取一平面镜，使其垂直于图面，并通过曲线上待作切线的点  $P$ （如图 1-1），然后让镜子绕  $P$  点转动，注意观察镜中曲线的影像，当镜子转到某一位置，使得曲线与其影像刚好平滑地连为一条曲线时，过  $P$  点沿镜子作一直线即为  $P$  点的法线，过  $P$  点再作法线的垂线，就是曲线上  $P$  点的切线。若无镜子，可用玻璃棒代替，方法相同。

b. 平行线段法 如图 1-2，在选择的曲线段上作两条平行线  $AB$  及  $CD$ ，然后连接  $AB$  和  $CD$  的中点  $PQ$  并延长相交曲线于  $O$  点，过  $O$  点作  $AB$ 、 $CD$  的平行线  $EF$ ，则  $EF$  就是曲线上  $O$  点的切线。

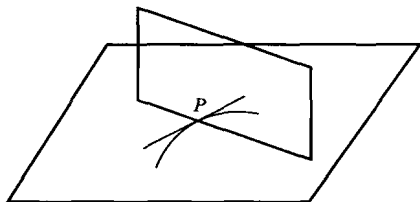


图 1-1 镜像法示意图

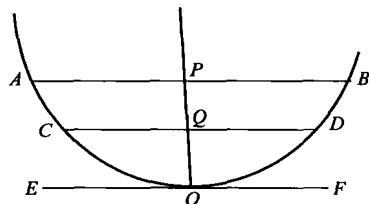


图 1-2 平行线段法示意图

## 3. 数学方程式法

将一组实验数据用数学方程式表达出来是最为精练的一种方法。它不但方式简单，而且便于进一步求解，如积分、微分、内插等。此法首先要找出变量之间的函数关系，然后将其

线性化，进一步求出直线方程的系数斜率  $m$  和截距  $b$ ，即可写出方程式。也可将变量之间的关系直接写成多项式，通过计算机曲线拟合求出方程系数。

求直线方程系数一般有三种方法：图解法、平均法和最小二乘法。

#### 四、物理化学实验室安全知识

在化学实验室里，安全是非常重要的，它常常潜藏着诸如发生爆炸、着火、中毒、灼伤、割伤、触电等事故的危险性，如何来防止这些事故的发生以及万一发生又如何来急救，是每一个化学实验工作者必须具备的素质。这些内容在先行的化学实验课中均已反复地作了介绍。本节主要结合物理化学实验的特点介绍安全用电、使用化学药品的安全防护等知识。

##### 1. 安全用电常识

违章用电常常可能造成人身伤亡、火灾、损坏仪器设备等严重事故。物理化学实验室使用电器较多，特别要注意安全用电。表 1-2 列出了 50Hz 交流电通过人体的反应情况。为了保障人身安全，一定要遵守实验室安全规则。

表 1-2 不同电流强度时的人体反应

| 电流强度 | 1~10V | 10~25V | 25~100V     | 100V 以上      |
|------|-------|--------|-------------|--------------|
| 人体反应 | 麻木感   | 肌肉强烈收缩 | 呼吸困难，甚至停止呼吸 | 心脏心室纤维性颤动，死亡 |

##### (1) 防止触电

- ① 不用潮湿的手接触电器。
- ② 电源裸露部分应有绝缘装置（例如电线接头处应裹上绝缘胶布）。
- ③ 所有电器的金属外壳都应保护接地。
- ④ 实验时，应先连接好电路后再接通电源。实验结束时，先切断电源再拆线路。
- ⑤ 修理或安装电器时，应先切断电源。
- ⑥ 不能用试电笔去试高压电。使用高压电源应有专门的防护措施。
- ⑦ 如有人触电，应迅速切断电源，然后进行抢救。

##### (2) 防止引起火灾

- ① 使用的保险丝要与实验室允许的用电量相符。
- ② 电线的安全通电量应大于用电功率。
- ③ 室内若有氢气、煤气等易燃易爆气体，应避免产生电火花。继电器工作和开关电闸时，易产生电火花，要特别小心。电器接触点（如电插头）接触不良时，应及时修理或更换。
- ④ 如遇电线起火，立即切断电源，用沙或二氧化碳、四氯化碳灭火器灭火，禁止用水或泡沫灭火器等导电液体灭火。

##### (3) 防止短路

- ① 线路中各接点应牢固，电路元件两端接头不要互相接触，以防短路。
- ② 电线、电器不要被水淋湿或浸在导电液体中，例如实验室加热用的灯泡接口不要浸在水中。

##### (4) 电器仪表的安全使用

- ① 在使用前，先了解电器仪表要求使用的电源是交流电还是直流电；是三相电还是单相电以及电压的大小（380V、220V、110V 或 6V）。须弄清电器功率是否符合要求及直流

电器仪表的正、负极。

② 仪表量程应大于待测量。若待测量大小不明时，应从最大量程开始测量。

③ 实验之前要检查线路连接是否正确。经教师检查同意后方可接通电源。

④ 在电器仪表使用过程中，如发现有不正常声响，局部温升或嗅到绝缘漆过热产生的焦味，应立即切断电源，并报告教师进行检查。

## 2. 使用化学药品的安全防护

### (1) 防毒

① 实验前，应了解所用药品的毒性及防护措施。

② 操作有毒气体（如  $\text{H}_2\text{S}$ 、 $\text{Cl}_2$ 、 $\text{Br}_2$ 、 $\text{NO}_2$ 、浓  $\text{HCl}$  和  $\text{HF}$  等）应在通风橱内进行。

③ 苯、四氯化碳、乙醚、硝基苯等的蒸气会引起中毒。它们虽有特殊气味，但久嗅会使人嗅觉减弱，所以应在通风良好的情况下使用。

④ 有些药品（如苯、有机溶剂、汞等）能透过皮肤进入人体，应避免与皮肤接触。

⑤ 氰化物、高汞盐 [ $\text{HgCl}_2$ 、 $\text{Hg}(\text{NO}_3)_2$  等]、可溶性钡盐 ( $\text{BaCl}_2$ )、重金属盐（如镉、铅盐）、三氧化二砷等剧毒药品，应妥善保管，使用时要特别小心。

⑥ 禁止在实验室内喝水、吃东西。饮食用具不要带进实验室，以防毒物污染，离开实验室及饭前要洗净双手。

### (2) 防爆

可燃气体与空气混合，当两者比例达到爆炸极限时，受到热源（如电火花）的诱发，就会引起爆炸。

① 使用可燃性气体时，要防止气体逸出，室内通风要良好。

② 操作大量可燃性气体时，严禁同时使用明火，还要防止发生电火花及其他撞击火花。

③ 有些药品如叠氮铝、乙炔银、乙炔铜、高氯酸盐、过氧化物等受震和受热都易引起爆炸，使用要特别小心。

④ 严禁将强氧化剂和强还原剂放在一起。

⑤ 久藏的乙醚使用前应除去其中可能产生的过氧化物。

⑥ 进行容易引起爆炸的实验，应有防爆措施。

### (3) 防火

① 许多有机溶剂如乙醚、丙酮、乙醇、苯等非常容易燃烧，大量使用时室内不能有明火、电火花或静电放电。实验室内不可存放过多这类药品，用后还要及时回收处理，不可倒入下水道，以免聚集引起火灾。

② 有些物质如磷、金属钠、钾、电石及金属氢化物等，在空气中易氧化自燃。还有一些金属如铁、锌、铝等粉末，比表面大，也易在空气中氧化自燃。这些物质要隔绝空气保存，使用时要特别小心。

实验室如果着火不要惊慌，应根据情况进行灭火，常用的灭火剂有：水、沙、二氧化碳灭火器、四氯化碳灭火器、泡沫灭火器和干粉灭火器等。可根据起火的原因选择使用，以下几种情况不能用水灭火。

a. 金属钠、钾、镁、铝粉、电石、过氧化钠着火，应用干沙灭火。

b. 比水轻的易燃液体，如汽油、苯、丙酮等着火，可用泡沫灭火器。

c. 有灼烧的金属或熔融物的地方着火时，应用干沙或干粉灭火器。

d. 电器设备或带电系统着火，可用二氧化碳灭火器或四氯化碳灭火器。

## (4) 防灼伤

强酸、强碱、强氧化剂、溴、磷、钠、钾、苯酚、冰醋酸等都会腐蚀皮肤，特别要防止溅入眼内。液氧、液氮等低温也会严重灼伤皮肤，使用时要小心。万一灼伤，应及时治疗。

## 3. 汞的安全使用

汞中毒分急性和慢性两种。急性中毒多为高汞盐（如  $\text{HgCl}_2$ ）入口所致，0.1~0.3g 即可致死。吸入汞蒸气会引起慢性中毒，症状有：食欲不振、恶心、便秘、贫血、骨骼和关节疼、神经衰弱等。汞蒸气的最大安全浓度为  $0.1\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ ，而  $20^\circ\text{C}$  时汞的饱和蒸气压为  $0.0012\text{mmHg}$  ( $1\text{mmHg}=133.322\text{Pa}$ ，下同)，超过安全浓度 100 倍。所以使用汞必须严格遵守安全用汞操作规定。

- ① 不要让汞直接暴露于空气中，盛汞的容器应在汞面上加盖一层水。
- ② 装汞的仪器下面一律放置浅瓷盘，防止汞滴散落到桌面上和地面上。
- ③ 一切转移汞的操作，也应在浅瓷盘内进行（盘内装水）。
- ④ 实验前要检查装汞的仪器是否放置稳固。橡皮管或塑料管连接处要缚牢。
- ⑤ 储汞容器要用厚壁玻璃器皿或瓷器。用烧杯暂时盛汞，不可多装以防破裂。
- ⑥ 若有汞掉落在桌上或地面上，先用吸汞管尽可能将汞珠收集起来，然后用硫磺盖在汞溅落的地方，并摩擦使之生成  $\text{HgS}$ 。也可用  $\text{KMnO}_4$  溶液使其氧化。

- ⑦ 擦过汞或汞齐的滤纸或布必须放在有水的瓷缸内。
- ⑧ 盛汞器皿和有汞的仪器应远离热源，严禁把有汞仪器放进烘箱。
- ⑨ 使用汞的实验室应有良好的通风设备，纯化汞应有专用的实验室。
- ⑩ 手上若有伤口，切勿接触汞。

## 4. 高压钢瓶的使用及注意事项

## (1) 气体钢瓶的颜色标记

见表 1-3。

表 1-3 我国气体钢瓶常用的标记

| 气体类别 | 瓶身颜色 | 标字颜色 | 气体类别 | 瓶身颜色 | 标字颜色 |
|------|------|------|------|------|------|
| 氮气   | 黑    | 黄    | 液氨   | 黄    | 黑    |
| 氧气   | 天蓝   | 黑    | 氯    | 草绿   | 白    |
| 氢气   | 深蓝   | 红    | 乙炔   | 白    | 红    |
| 压缩空气 | 黑    | 白    | 石油气体 | 灰    | 红    |
| 二氧化碳 | 黑    | 黄    | 纯氩气体 | 灰    | 绿    |
| 氦    | 棕    | 白    |      |      |      |

## (2) 气体钢瓶的使用

① 在钢瓶上装上配套的减压阀。检查减压阀是否关紧，方法是逆时针旋转调压手柄至螺杆松动为止。

- ② 打开钢瓶总阀门，此时高压表显示出瓶内储气总压力。
- ③ 慢慢地顺时针转动调压手柄，至低压表显示出实验所需压力为止。
- ④ 停止使用时，先关闭总阀门，待减压阀中余气逸尽后，再关闭减压阀。

## (3) 注意事项

- ① 钢瓶应存放在阴凉、干燥、远离热源的地方。可燃性气瓶应与氧气瓶分开存放。
- ② 搬运钢瓶要小心轻放，钢瓶帽要旋上。