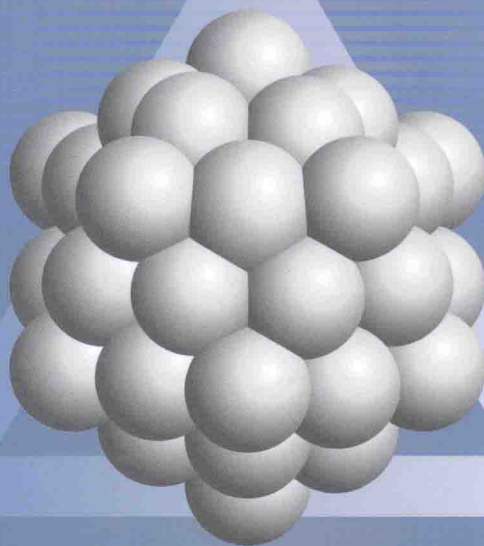


高等学校教材

物理化学实验

天津大学物理化学教研室 编
冯霞 朱莉娜 朱荣娇



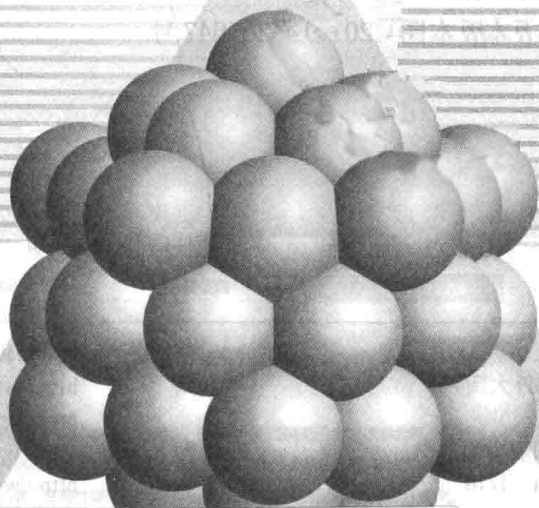
高等教育出版社

高等学校教材

物理化学实验

WULI HUAXUE SHIYAN

天津大学物理化学教研室 编
冯 霞 朱莉娜 朱荣娇



高等教育出版社·北京

内容简介

本书是天津大学化学系在总结多年来物理化学实验教学经验的基础上编写而成的。全书分为绪论、物理化学测量技术与方法、实验、物理化学实验室常用仪器和附录五个部分。内容包括物理化学实验的基本要求、基本测量技术与方法、24个物理化学实验项目、9种常用仪器的工作原理和使用方法,以及15组常用数据表。

本书可作为高等学校化学与化工类、材料类、药学、生命科学和环境科学等专业物理化学实验教材,也可供其他相关专业选用和相关技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

物理化学实验 / 冯霞, 朱莉娜, 朱荣娇编. — 北京: 高等教育出版社, 2015. 1

ISBN 978-7-04-041440-0

I. ①物… II. ①冯… ②朱… ③朱… 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(2014)第261647号

策划编辑 李颖
插图绘制 杜晓丹

责任编辑 李颖
责任校对 陈杨

封面设计 王琰
责任印制 田甜

版式设计 马敬茹

出版发行 高等教育出版社
社址 北京市西城区德外大街4号
邮政编码 100120
印刷 北京宏伟双华印刷有限公司
开本 787mm×960mm 1/16
印张 15
字数 270千字
购书热线 010-58581118

咨询电话 400-810-0598
网址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>
网上订购 <http://www.landaco.com>
<http://www.landaco.com.cn>
版次 2015年1月第1版
印次 2015年1月第1次印刷
定价 22.30元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换
版权所有 侵权必究
物料号 41440-00

与本书配套的数字课程资源使用说明

与本书配套的数字课程资源发布在高等教育出版社易课程网站，请登录网站后开始课程学习。

1. 访问 <http://abook.hep.com.cn/12365910>
2. 输入数字课程账号（见封底明码）、密码、验证码
3. 点击“进入课程”
4. 开始课程学习

账号自登录之日起一年内有效，过期作废。

使用本账号如有任何问题，请发邮件至：zhangshan@hep.com.cn

易课程
course

物理化学实验

天津大学物理化学教研室
冯霞 朱莉娜 朱荣娟 编

用户名 密码 验证码 3355

数字课程介绍 纸质教材 版权信息 联系方式

物理化学数字课程与纸质教材一体化设计,紧密配合。数字课程涵盖课程介绍、教学大纲、电子教案、实验装置图、拓展图片素材、教学录像等板块。充分运用多种形式媒体资源,极大地丰富了知识的呈现形式,拓展了教材内容。在提升课程教学效果同时,为学生学习提供思维与探索的空间。

系列教材

物理化学 (第五版) (上、下册)
天津大学物理化学教研室 编
书号: 978-7-04-026279-7; 978-7-04-026280-3

物理化学 (简明版)
天津大学物理化学教研室 编
书号: 978-7-04-029178-0

Copyright © 2014-2015 高等教育出版社 版权所有

前 言

物理化学实验是基础化学实验的重要组成部分,着重训练学生依据所学的物理化学原理,借助合适的实验仪器,获取数据、验证规律,以及灵活运用理论知识解决实际问题的能力,在化学化工类创新型人才培养中起着十分重要的作用。

本书是在天津大学多年使用的物理化学实验相关教材和讲义的基础上,结合新形势下实验教学的现状和要求编写而成的,有以下几方面特点:

(1) 当前各高校基础教学普遍存在学时紧张的问题,无法开设大量实验课。本书在基本不增加学时的基础上,通过对实验内容进行丰富和完善,加强对学生的训练。以“恒温槽的使用及黏度测定”实验为例,将传统的每个学生完成同样的实验内容,调整为分组完成不同温度的实验测定,再相互配合进行液体黏度—温度关系研究。这大大丰富了实验内容,同时培养学生的团队合作精神。

(2) 引入新的科学仪器。采用数显的温度、压力测量仪器取代传统的测温、测压装置,以适应当前大多数学校的实验设备配置情况。

(3) 安排实验时既考虑到基本的物理化学实验训练,又考虑到学生将来从事科学研究的需要,对一些在科研中常用的大型仪器安排了相应的实验,如 X 射线衍射法分析固体材料、固体比表面积测定、差热分析等。

(4) 本书配有网络资源,方便学生远程预习及更好地把握实验细节。

本书分为绪论、物理化学测量技术与方法、实验项目、物理化学实验室常用仪器和附录五个部分:

绪论部分介绍了物理化学实验的目的和要求、实验数据处理方法、计算机在数据处理中的应用、实验室安全知识。

物理化学测量技术与方法中系统介绍了温度和压力的测量与控制、真空技术、电化学测量技术和量热技术等基本的现代物理化学实验技术。

实验部分安排了 24 个具有代表性的实验,内容涵盖化学热力学、化学动力学、电化学、表面和胶体化学、结构化学等,力求与物理化学理论课程内容紧密结合,同时兼顾物理化学实验独立设课的特点。每个实验均对实验目的、基本原理、仪器和药品、实验步骤、注意事项、数据记录及处理等进行了较为详细的叙述,使学生在认真预习的基础上,经教师稍加指导即可独立完成实验。

物理化学实验室常用仪器部分介绍了物理化学实验中常用的 9 种仪器,着

II 前言

重介绍仪器的工作原理和使用方法。

附录列出了15组物理化学实验中的常用数据。数据主要来自国内外广泛使用的一些数据手册,编入时对一些常用数据进行了补充和更新,以保证数据的完整可靠。这些数据表既可供学生处理实验数据使用,也可供相关科研人员参考。

编写本书的教师长期从事物理化学理论课和实验课教学,基础扎实,经验丰富。本书绪论、物理化学测量技术与方法、物理化学实验室常用仪器和附录分别由朱莉娜、冯霞和朱荣娇编写,实验部分由三人共同完成,全书由冯霞统稿。

教材建设是一项不断传承和发展的集体事业,本书的编写和出版是多年来天津大学物理化学教研室从事物理化学理论和实验教学的教师们共同努力的结果。编写过程中也参阅了部分兄弟院校的同类教材和相关著作,借鉴了很多有益的思路。天津大学化学系的田宜灵教授、刘俊吉教授、周亚平教授和李松林教授等对本书的编写提出了许多建设性的意见,刘洋、许延芳参与了部分网络资源的编制,在此一并表示感谢!

由于编者水平和经验有限,书中存在一些疏漏、缺点甚至谬误在所难免,希望广大读者予以批评指正。

编者

2014年8月于天津

郑重声明

高等教育出版社依法对本书享有专有出版权。任何未经许可的复制、销售行为均违反《中华人民共和国著作权法》，其为人将承担相应的民事责任和行政责任；构成犯罪的，将被依法追究刑事责任。为了维护市场秩序，保护读者的合法权益，避免读者误用盗版书造成不良后果，我社将配合行政执法部门和司法机关对违法犯罪的单位和个人进行严厉打击。社会各界人士如发现上述侵权行为，希望及时举报，本社将奖励举报有功人员。

反盗版举报电话 (010) 58581897 58582371 58581879

反盗版举报传真 (010) 82086060

反盗版举报邮箱 dd@hep.com.cn

通信地址 北京市西城区德外大街4号 高等教育出版社法务部

邮政编码 100120

目 录

绪论	1
§ 0.1 物理化学实验的目的和要求	1
§ 0.2 物理化学实验数据的记录与处理	3
§ 0.3 利用计算机处理物理化学实验数据	8
§ 0.4 物理化学实验室安全知识	22
第 1 章 物理化学测量技术与方法	29
§ 1.1 温度的测量与控制	29
§ 1.2 压力的测量与控制	40
§ 1.3 真空技术	48
§ 1.4 电化学测量技术	54
§ 1.5 量热技术	61
第 2 章 实验	71
实验 1 恒温槽的使用及黏度测定	71
实验 2 凝固点降低法测定摩尔质量	80
实验 3 液体饱和蒸气压的测定	85
实验 4 反应焓的测定	88
实验 5 反应平衡常数的测定及热力学	95
实验 6 二组分液相完全互溶系统的沸点-组成图	99
实验 7 二组分凝聚系统相图	104
实验 8 差热分析	109
实验 9 无限稀释溶液活度因子的测定	112
实验 10 原电池电动势的测定及原电池热力学	115
实验 11 电导法测定弱电解质解离度和解离常数	121
实验 12 离子迁移数测定	125
实验 13 极化曲线和氢超电势的测定	130
实验 14 过氧化氢催化分解反应动力学	132

II 目录

实验 15	乙酸乙酯皂化反应速率常数和活化能的测定	137
实验 16	蔗糖水解反应速率常数的测定	141
实验 17	过二硫酸铵与碘化钾反应速率与活化能的测定	145
实验 18	最大泡压法测定溶液的表面张力	149
实验 19	BET 容量法测定固体比表面积	153
实验 20	表面活性剂的类型鉴别及临界胶束浓度 CMC 的测定	159
实验 21	溶胶的制备及 ζ 电势与电解质聚沉值的测定	163
实验 22	偶极矩的测定	168
实验 23	磁化率的测定	174
实验 24	X 射线粉末衍射分析	179
第 3 章	物理化学实验室常用仪器	184
§ 3.1	阿贝折射仪	184
§ 3.2	直流电位差计	188
§ 3.3	检流计	192
§ 3.4	电导仪和电导率仪	194
§ 3.5	旋光仪	198
§ 3.6	磁天平	201
§ 3.7	Cp-3800 型气相色谱仪	204
§ 3.8	Tristar 3000 全自动比表面积和孔隙分析仪	207
§ 3.9	Rigaku D/max-2500/PC 型 X 射线衍射仪	210
附录		216
一、	不同温度下水的饱和蒸气压	216
二、	不同温度下水的密度	217
三、	不同温度下常见有机化合物的相对密度	218
四、	水在不同温度下的折射率和介电常数	219
五、	水在不同温度下的黏度	219
六、	水在不同温度下的表面张力	220
七、	一些难溶化合物的溶度积 K_{sp} (298K)	220
八、	25 °C 时水溶液中一些电极的标准电极电势	224
九、	不同温度下 KCl 在水中的溶解热	225
十、	不同温度、不同浓度的 KCl 标准溶液的电导率 κ	225
十一、	常见液体在 25 °C 时的折射率	226

十二、常见溶剂的凝固点降低常数	226
十三、18 °C下水溶液中阴离子的迁移数	227
十四、不同温度下 HCl 水溶液中阳离子的迁移数	227
十五、常见物质的介电常数	227
参考文献	228

绪 论

§ 0.1 物理化学实验的目的和要求

0.1.1 物理化学实验的目的

物理化学实验是化学实验学科的重要分支,是物理化学理论课必不可少的组成部分。物理化学实验综合运用了物理学和化学领域一些重要的实验技术和手段及数学运算方法来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。

物理化学实验的目的和作用有

(1) 通过物理化学实验,巩固和加深对物理化学理论知识的理解,提高对物理化学知识灵活运用能力;

(2) 掌握物理化学实验的基本方法和技能,能够根据所学原理设计实验,正确选择和使用仪器;

(3) 锻炼仔细观察实验现象、正确记录数据和处理数据、分析实验结果的能力;

(4) 通过实验操作及数据处理,培养学生实际动手能力和分析问题、解决实际问题的能力;

(5) 以测量系统的物理量为基本内容,通过对所测实验数据的处理分析获得系统的一些规律,初步培养学生科学研究的能力;培养实事求是的科学态度,严肃认真、一丝不苟的科学作风。

0.1.2 物理化学实验的要求

1. 做好预习

进入实验室之前必须仔细阅读实验指导书,了解实验目的和原理,明确实验方法、仪器、条件、需要注意的问题等。由于基础物理化学实验均是以测量物理量为实验内容的,因此通过实验预习,需要对如下问题心中有数:(1) 本次实验

2 绪论

中要测定什么物理量？(2) 实验最终要得到什么物理量？(3) 如何由所测物理量得到最终物理量？(4) 使用什么实验方法？该方法的测量原理？(5) 用到哪些仪器和药品？(6) 如何操作？操作条件及注意事项是什么？

在预习的基础上写出预习报告，预习报告内容包括实验目的，简要的操作步骤、实验注意事项及数据记录表格等。预习报告供学生自己在实验中参考使用，要留有足够的空间，可以根据实际需要修改和调整原始数据表格，记录特殊实验现象等。

进入实验室后，首先要核对仪器与药品，检查仪器是否完好，药品的种类、浓度等是否与本书要求一致，发现问题应该及时向指导教师提出，然后对照仪器、药品进一步预习实验。

2. 认真实验

在开始实验操作前，要认真听教师讲解实验的要点，接受教师的提问检查，经教师同意后方可进行实验。

在实验中，使用仪器要严格按照操作规程进行，不可盲目操作以免损毁仪器或发生安全事故。通过预习和教师讲解，应该对实验操作步骤做到心中有数，不可“照方抓药”。实验过程中要细心操作，仔细观察实验现象，认真思考问题，准确记录原始数据，对不明白的问题要及时请教教师，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、签字，数据不合格的应重做，直至获得满意结果。

一般情况下物理化学实验的数据较多，要养成良好的实验数据记录习惯。根据仪器的精度，把原始数据详细、准确、实事求是地记录在预习报告上，记录时应尽量采用表格形式，做到整洁、清楚。所记录的原始实验数据不得随意涂改，要养成实事求是、科学严谨的态度。

在实验中还需注意操作安全、爱护仪器。不得做与实验无关的事，不得动与自己实验无关的仪器设备。实验完毕后，应清洗、核对仪器，做好实验室卫生工作，经指导教师同意后，方可离开实验室。

3. 正确书写实验报告

学生应在规定时间内独立完成实验报告，并及时提交。一份完整的实验报告应包含下列内容：实验名称；实验日期、环境状况、实验操作者；实验目的；简明原理；仪器、药品；简单操作步骤或操作流程；原始数据；数据处理及结果分析；实验结果分析；思考题回答。

书写实验报告时需要特别注意两点：一是根据实际过程，记录实验中使用到的药品名称、纯度和浓度，仪器名称及精度，以及真实的实验操作步骤或流程。二是正确处理数据和进行结果分析。正确、科学地处理实验数据和分析实验结

果,是物理化学实验的一项重要内容。数据处理不能只给出处理结果,而应有详细的处理方法和步骤;用图、表来表达实验结果时要科学、规范;同时要对结果进行必要的讨论,包括对实验现象的分析解释,对实验结果误差的定性分析或定量计算,实验的心得体会及对实验的改进意见等。通过数据处理及结果分析,可以进一步巩固学生对基础原理的掌握,锻炼学生分析问题、解决问题的能力。

§ 0.2 物理化学实验数据的记录与处理

0.2.1 实验数据的计算

进行数据计算求取物理量时,要先列出公式,再代入数值和单位进行计算。不能只给出处理结果,而没有公式和计算过程。对于采用同样方法重复进行的数据计算过程,可以以一典型过程为例说明具体的计算过程,其余的仅将计算结果列入表格中即可。由于物理量包含数值和单位两部分,注意对于计算结果要给出正确的单位。

0.2.2 数据列表

表格是物理化学实验中常用的数据表述形式。用表格表示实验数据和结果,具有鲜明、易读、信息集中的优势。列表时要注意以下几点:

(1) 表格要有名称(表题)。含有多个表格时,还要有表序。

(2) 每行(或列)的开头一栏(项目栏)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。对于数据公共的倍率因子也应写在项目栏中,与物理量符号表示在一起。

(3) 表体中的数字要排列整齐,小数点要对齐。

(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,但计算过程应在表格下方列出。

目前在科技论文中广泛使用三线表来表达实验数据。如图 0.2.1 所示,三线表中没有竖线,通常只有 3 条横线,即顶线、栏目线和底线,其中顶线和底线为粗线,栏目线为细线,必要时也可增加横线,但仍称为三线表。三线表的组成要素包括:表序、表题、项目栏、表体、表注。三线表的形式简洁、功能分明、阅读方便,建议在书写物理化学实验报告中采用三线表表达数据。

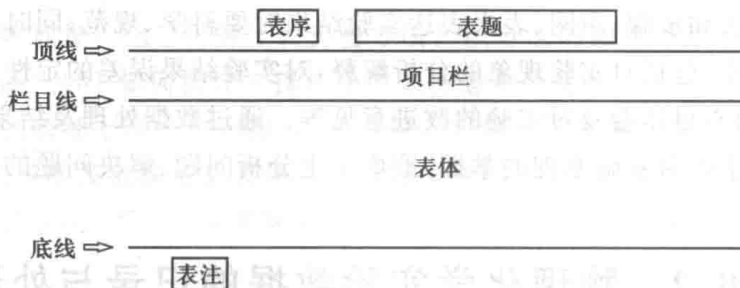


图 0.2.1 三线表的组成要素

0.2.3 数据作图

作图法可以形象、直观地表达数据的特点或显示物理量之间的函数关系,也可用来求取某些物理量及参数,因此是一种重要的数据处理方法。作图时要先整理出数据表格,使用坐标纸或绘图软件作图。作图应注意以下几点:

(1) 完整的图要有图题、坐标轴物理量及单位、线名或编号等。

图题包括图序和图名,位置应置于图的下方。图名在图序之后,两者之间空一格。图名应能简洁准确地表达图的主题。例如,“图 5-3 氨基甲酸铵分解反应 $\ln k^{\ominus} - 1/T$ 图”等。图名后根据需要还可以增加图注。

坐标轴应标明所表示的物理量及单位,二者表示为相除的形式。在直角坐标中,一般以横坐标代表自变量,纵坐标代表因变量。

(2) 选择合适的坐标分度,根据坐标分度和数据范围确定图的大小。坐标分度值的选取应能反映测量值的有效位数,一般以 1~2 mm 对应于测量仪表的仪表误差。再根据数据范围确定坐标范围,选择的作标纸应略大于坐标范围。

(3) 选取坐标轴的比例要适当,坐标原点不一定选在零,应使所作直线或曲线匀称地分布于图面中,图形大体布满整个坐标系为佳。

(4) 实验数据点要表示得准确、清晰,可用 \circ , \triangle , \square , \times 等符号描绘数据点,使之清晰醒目,符号总面积表示了实验数据误差的大小,所以不应超过 1 mm^2 。同一图中表示不同曲线时,要用不同的符号描点以示区别,并在图注中说明。

(5) 对实验数据进行曲(直)线拟合时,不要求曲线通过每一个实验点,而是要求各实验点尽可能分布在所作图线附近,符合最小二乘法原理。

图 0.2.2 是规范的图与不规范的图的示例,可以通过两者的对比,体会作图需要注意的事项。

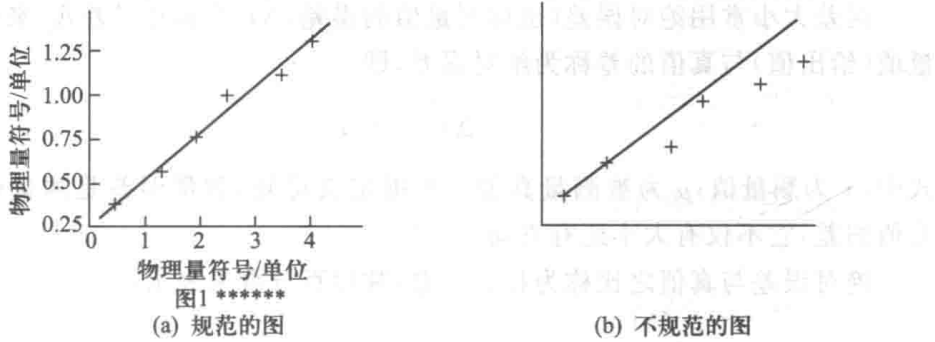


图 0.2.2 规范的图与不规范的图的示例

0.2.4 实验误差的分类与计算

1. 误差分类

误差指测量结果偏离真值的程度。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多方面条件的限制,任何测量都不可能得到一个绝对准确的数值,这种测量值和真实值之间的差异称为误差。对误差产生的原因及其规律进行研究,可在合理的人力物力支出条件下获得可靠的实验结果。因此,对实验结果进行误差计算及分析在实验科学中是必不可少的。

根据误差的特征和表现形式,可将误差分为系统误差(systematic error)和随机误差(indeterminate error)两类。系统误差是指由某种确定的原因造成的误差,一般有固定的方向和大小,重复测量时重复出现。根据系统误差产生的原因,可以进一步分为方法误差、仪器(或试剂)误差和操作误差三种。原则上这种误差能够针对产生的原因进行消减或修正。随机误差是由一些偶然的、不可避免的原因造成的误差,其特点是大小和方向(正、负)都不固定,总体来看这类误差服从统计规律(正态分布),不能用加校正值的方法消除,但可以通过增加平行测定次数来消减。除上述两类误差外,还有一种误差是由于测量条件的突发性变化或者由于读错、记错等原因引起数据异常造成的,称为粗大误差,简称粗差,应尽量避免出现这类误差,出现粗差的数据必须剔除。

习惯上用“正确度”来反映系统误差大小;用“精密度”来反映随机误差大小;用“准确度”综合评定测量结果重复性及与真值一致性的程度。“准确度”有时也称为“精确度”。“精度”通常是“精密度”的简称,但有时也用来作为“精确度”的简称。

2. 误差的表达与计算

误差大小常用绝对误差(也称测量值的误差) Δx 及相对误差 E_r 来表示。测量值(给出值)与真值的差称为绝对误差,即

$$\Delta x = x - \mu \quad (0.2.1)$$

式中, x 为测量值; μ 为被测量真值。根据定义可知,测量误差是测量值与客观真值的差,它不仅有大小的还有方向(正、负)。

绝对误差与真值之比称为相对误差,常用百分数来表示:

$$E_r = \frac{\Delta x}{\mu} \times 100\% \quad (0.2.2)$$

3. 误差的传递

一些复杂的不易直接测量的物理量,可通过多步的对简单物理量的测量,按照一定的函数关系计算出来。这中间每一步都可能存在误差,都要引入最终的间接测量结果中。因此,必须要了解每步的测量误差对结果的影响。一般而言,误差的传递与各直接测量值的误差性质有关,也与结果的计算公式有关。误差传递符合一定的基本公式。通过对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密度,获得好的结果。

设有函数 $f=f(x,y)$,其中 x,y 为可直接测量物理量,则误差传递的基本公式为

$$df = \left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)_y dx + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)_x dy \quad (0.2.3)$$

设 $\Delta f, \Delta x, \Delta y$ 为 f, x, y 的测量误差且足够小,可以代替 df, dx, dy ,则可得到绝对误差

$$\Delta f = \left| \frac{\partial f}{\partial x} \right| \cdot \Delta x + \left| \frac{\partial f}{\partial y} \right| \cdot \Delta y \quad (0.2.4)$$

相对误差

$$\frac{\Delta f}{f} = \left| \frac{\partial \ln f}{\partial x} \right| \cdot \Delta x + \left| \frac{\partial \ln f}{\partial y} \right| \cdot \Delta y \quad (0.2.5)$$

根据上述公式可以得出:一些间接测量物理量与直接测量物理量存在简单函数关系时,间接测量物理量的算术平均差的计算公式,列于表 0.2.1。

表 0.2.1 部分函数的算术平均差

函数关系	绝对误差	相对误差
$y = x_1 + x_2$	$\pm (\Delta x_1 + \Delta x_2)$	$\pm \left(\frac{ \Delta x_1 + \Delta x_2 }{x_1 + x_2} \right)$
$y = x_1 - x_2$	$\pm (\Delta x_1 + \Delta x_2)$	$\pm \left(\frac{ \Delta x_1 + \Delta x_2 }{x_1 - x_2} \right)$
$y = x_1 x_2$	$\pm (x_1 \Delta x_2 + x_2 \Delta x_1)$	$\pm \left(\frac{ \Delta x_1 }{x_1} + \frac{ \Delta x_2 }{x_2} \right)$
$y = x_1 / x_2$	$\pm \left(\frac{x_1 \Delta x_2 + x_2 \Delta x_1 }{x_2^2} \right)$	$\pm \left(\frac{ \Delta x_1 }{x_1} + \frac{ \Delta x_2 }{x_2} \right)$
$y = x^n$	$\pm (n x^{n-1} \Delta x)$	$\pm \left(n \frac{ \Delta x }{x} \right)$
$y = \ln x$	$\pm \left(\frac{\Delta x}{x} \right)$	$\pm \left(\frac{ \Delta x }{x \ln x} \right)$

例如, 计算函数 $x = \frac{8LRP}{\pi(m-m_0)rd^2}$ 的误差, 其中 L, R, P, m, r, d 为直接测量值。对原函数式取对数:

$$\ln x = \ln 8 + \ln L + \ln R + \ln P - \ln \pi - \ln(m - m_0) - \ln r - 2 \ln d$$

微分得:
$$\frac{dx}{x} = \frac{dL}{L} + \frac{dR}{R} + \frac{dP}{P} - \frac{d(m - m_0)}{m - m_0} - \frac{dr}{r} - \frac{2d(d)}{d}$$

考虑到误差积累, 对每一项取绝对值得

$$\text{绝对误差: } \Delta x = \left(\frac{\Delta x}{x} \right) \cdot \frac{8LRP}{\pi(m - m_0)rd^2}$$

$$\text{相对误差: } \frac{\Delta x}{x} = \pm \left(\frac{\Delta L}{L} + \frac{\Delta R}{R} + \frac{\Delta P}{P} + \frac{\Delta(m - m_0)}{m - m_0} + \frac{\Delta r}{r} + \frac{2\Delta d}{d} \right)$$

根据 $\frac{\Delta L}{L}, \frac{\Delta R}{R}, \frac{\Delta P}{P}, \frac{\Delta(m - m_0)}{m - m_0}, \frac{\Delta r}{r}, \frac{2\Delta d}{d}$ 各项的大小, 可以判断间接测量值 x 的最大误差来源。

0.2.5 有效数字

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