

化工原理实验

主 编 刘庆旺 吴建伟

 北京理工大学出版社
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

化工原理实验

主 编 刘庆旺 吴建伟

 北京理工大学出版社

BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

内 容 简 介

本书共分为五部分，主要内容包括：绪论、化工原理实验数据处理、化工原理实验中常用仪表、化工原理基础实验和附录。实验部分精选全国高校化工原理课程教学指导委员会规定的内容，包括：伯努利方程实验、三管传热实验、筛板精馏实验、吸收与解吸实验、萃取实验、雷诺实验、多功能干燥实验、综合流体力学实验、超临界 CO₂ 流体萃取大豆油实验、恒压过滤实验、膜分离实验、温度标定实验、压力仪表标定实验等十三个实验。书末两个附录分别为法定计量单位及换算、化工原理实验中常用数据表。

本书实用性强，主要作为高等院校化学工程与工艺专业及其他相关专业的化工原理实验教材或参考书。

版权专有 侵权必究

图书在版编目 (C I P) 数据

化工原理实验 / 刘庆旺, 吴建伟主编. -- 北京 :
北京理工大学出版社, 2023. 7
ISBN 978-7-5763-2665-9

I. ①化… II. ①刘… ②吴… III. ①化工原理-实
验-高等学校-教材 IV. ①TQ02-33

中国国家版本馆 CIP 数据核字 (2023) 第 142102 号

责任编辑：李 薇 文案编辑：李 硕
责任校对：刘亚男 责任印制：李志强

出版发行 / 北京理工大学出版社有限责任公司
社 址 / 北京市丰台区四合庄路 6 号
邮 编 / 100070
电 话 / (010) 68914026 (教材售后服务热线)
 (010) 68944437 (课件资源服务热线)
网 址 / <http://www.bitpress.com.cn>

版 印 次 / 2023 年 7 月第 1 版第 1 次印刷
印 刷 / 涿州市新华印刷有限公司
开 本 / 787 mm×1092 mm 1/16
印 张 / 8.25
字 数 / 184 千字
定 价 / 82.00 元

图书出现印装质量问题，请拨打售后服务热线，负责调换

前 言

化工原理实验是结合化工原理理论教学开设的实验课程，是化工专业教学中的实践环节。学习和掌握化工原理实验及其研究方法是学生从理论学习到工程应用的重要实践过程。通过化工原理实验学习有助于巩固学生的理论知识，提高学生的工程实践能力，让学生切身体验化工原理实验的实践性，培养学生分析和解决复杂工程问题的能力，进一步拓展学生开展科学研究、开发应用和创新的能力，为化工生产及科学研究培养工程应用型人才。

本书根据高等院校化工原理实验教学的实际需要和课程体系的基本要求，结合工程教育专业认证指标体系的人才培养要求，融合淮南师范学院及兄弟院校多年的实验教学经验和改革成果编写而成。本书内容选取注重理论联系实际，突出实验教学中的实践性和工程性，既以化工单元操作实验研究中常用的基础实验技术为主要内容，又与工程实际相结合。本书内容分为绪论、化工实验数据处理、化工实验常用仪表、化工原理基础实验和附录。

本书由淮南师范学院刘庆旺、吴建伟主编和统稿，本书在编写过程中得到了魏亦军、胡云虎、徐迈、梁铄、孟莹、徐博，以及其他负责化工原理实验课程教学教师的大力支持和帮助，在此表示衷心的感谢。同时感谢莱帕克（北京）科技有限公司提供的实验设备和技术参数。企业标准和行业需求是本书持续改进的动力之源。

由于编者水平所限，疏漏之处在所难免，衷心希望各位专家和使用本书的师生予以批评指正，在此致以最真诚的感谢。

编 者

2022 年 12 月

目 录

绪 论	1
第一章 化工原理实验数据处理	7
第一节 实验数据的误差分析	7
第二节 实验数据处理	15
第二章 化工原理实验中常用仪表	18
第一节 温度测量仪表	18
第二节 压力测量仪表	23
第三节 流量测量仪表	30
第三章 化工原理基础实验	39
实验一 伯努利方程实验	39
实验二 三管传热实验	44
实验三 筛板精馏实验	51
实验四 吸收与解吸实验	58
实验五 萃取实验	65
实验六 雷诺实验	75
实验七 多功能干燥实验	79
实验八 综合流体力学实验	89
实验九 超临界 CO ₂ 流体萃取大豆油实验	101
实验十 恒压过滤实验	106
实验十一 膜分离实验	112
实验十二 温度标定实验	118
实验十三 压力仪表标定实验	120
附录 A 法定计量单位及换算	122
附录 B 化工原理实验中常用数据表	123
参考文献	126

绪 论

化工原理（单元操作）课程是化工、环境、生物化工等系或专业的重要基础技术课程。它的历史悠久，已形成了完整的教学内容与教学体系。化工原理课程中所涉及的理论和计算方法是与实验研究紧密联系的。化工原理是建立在实验基础上的课程，因此化工原理实验在这门课程中占有重要的地位。

长期以来化工原理实验常以验证课堂理论为主，教学安排上也仅作为化工原理课程的一部分。近 20 年来，由于化学工程、石油化工、生物工程的飞速发展，要求研制新材料、寻找新能源、开发高科技产品，因此对化工过程与设备的研究提出了更高的要求，新型高效率、低能耗的化工设备的研究也更为迫切。不少高等院校为了适应新形势的要求，加强了学生实践环节的教育，以培养有创造性和有独立工作能力的科技人才。许多教师提出化工原理实验应单独设置课程，制定实验课程的教学大纲，并确立化工原理实验课程在培养学生中的应有地位。

一、化工原理实验的教学目的

化工原理实验课程是化工类专业教学计划中的一门必修课程，其教学目的有以下三个。

1. 巩固和深化理论知识

化工原理课程中所讲授的理论、概念或公式，学生对它们的理解往往是肤浅的，对于各种影响因素的认识还不深刻，当学生做了化工原理实验后，对于基本原理的理解、公式中各种参数的来源以及使用范围会有更深入的认识。例如离心泵的性能实验，安排了不同转速下泵的性能测定。第一步，让学生固定泵的转速，改变阀门开度，测得一组恒定转速下的泵的性能曲线，再改变泵的转速，按同样操作步骤，可以得到变转速下一系列泵性能曲线；第二步，让学生固定管道中的阀门开度，改变泵的转速，可以得到一根管道性能曲线，再改变管道中的阀门开度，又可以测得改变管道阻力的一系列管道性能曲线。通过实验可测出一系列泵和管道的性能曲线，了解影响泵和管道性能的各种因素，从而帮助学生理解从书本上较难弄懂的概念。

2. 培养学生从事实验研究的能力

理工科高等院校的毕业生，必须具备一定的实验研究能力，主要包括：为了完成一定的研究课题，设计实验方案的能力；进行实验，观察和分析实验现象的能力；正确选择和使用测量仪表的能力；利用实验的原始数据进行数据处理以获得实验结果的能力；运用文字表达技术报告的能力。这些能力是进行科学研究的基础，学生只有通过一定数量的基础实验与综

合实验练习，才能掌握各种实验能力，通过实验课打下一定的基础，将来参加实际工作就可以独立地设计新实验和从事科研与开发。

3. 培养学生实事求是、严肃认真的学习态度

实验研究是实践性很强的工作，对从事实验者的要求是很高的，化工原理实验课程要求学生具有一丝不苟的工作作风和严肃认真的工作态度，从实验操作、现象观察到数据处理等各个环节都不能有丝毫马虎。如果粗心大意，敷衍了事，轻则实验数据不好，得不出什么结论，重则会造成设备损坏或人身事故。

总之，实验教学对于学生的培养是不容忽视的，对学生动手和解决实际问题能力的锻炼是书本无法代替的。化工原理实验教学对于化工专业的学生来说仅仅是工程实践教学的开始，在高年级的专业实验和毕业论文阶段还要继续提高。

二、化工原理实验的教学要求

化工原理实验对于学生来说是第一次用工程装置进行实验，学生往往感到陌生，无从下手。有的学生又因为是几个人一组而有依赖心理，为了切实收到教学效果，要求每个学生必须做到以下三点。

1. 实验前的预习

学生实验前必须认真地预习实验指导书，清楚地了解实验目的、要求、原理及实验步骤，对于实验所涉及的测量仪表也要预习它们的使用方法。

有计算机辅助教学手段时，让学生进行计算机仿真练习，通过计算机熟悉各个实验的操作步骤和注意事项。学生们在预习和仿真练习的基础上写出实验预习报告。报告内容为实验目的、原理、装置情况、注意事项。最后还要进行现场了解，做到心中有数。经指导教师提问检查后方可进行实验。

2. 实验中的操作训练

实验中的操作训练操作是动手动脑的重要过程，学生一定要严格按照操作规程进行。要安排好测点的范围、测点的数目，明确哪些地方测点要取得密一些，等等。调试时要求细心，操作平稳。对于实验过程中的现象，仪表读数的变化要仔细观察，实验数据要记录在表格内，并注明单位、条件。实验现象要尽量详细记录在记录本内，绝不能记在随便取来的零散纸上，有些当时不能理解的实验现象，重复进行一遍仍然如此，需如实记录下来，待实验结束经过思考后，提出自己的看法或结论。学生应在实验操作中注意培养自己严谨的科学作风，养成良好的习惯。

3. 实验后的总结

实验后的总结是以实验报告的形式完成的。实验报告是一项技术文件，是学生用文字表达技术资料的一种训练，不少学生对实验报告没有给予足够的重视，或者不会用准确的、科学的数字和观点来书写报告，图形表达也缺乏训练，因此，对学生来说，需要严格训练编写实验报告的能力，这对今后写好研究报告和科研论文是必不可少的。

实验报告可在预习报告的基础上完成，它包括以下内容：实验目的、流程和操作步骤，

数据整理（包括一个计算示例）和结论。有时还要加上问题讨论等。

实验报告必须书写工整，图形绘制必须用直尺或曲线板。实验报告是考核实验成绩的主要依据，应认真对待。

三、化工原理实验安全知识

化工原理实验与一般化学实验有共同点，也有其本身的特殊性。为了安全、成功地完成实验，除了每个实验的特殊要求，在这里再提出一些化工原理实验中必须遵守的注意事项和必须具备的安全知识。

1. 化工原理实验安全注意事项

(1) 启动设备前必须完成的工作：

①对于泵、风机、压缩机、电动机等转动设备，用手使其运转，从感觉及声响上判别有无异常，检查润滑油位是否正常；

②检查设备上各阀门的开、关状态；

③检查接入设备的仪表开、关状态；

④检查拥有的安全措施，如防护罩、绝缘垫、隔热层等。

(2) 使用仪器、仪表前必须做的工作：

①熟悉原理与结构；

②掌握连接方法与操作步骤；

③分清量程范围，掌握正确的读数方法。

(3) 实验过程中的注意事项如下。

①操作过程中注意分工配合，严守自己的岗位，精心操作。实验过程中，随时观察仪表指示值的变动，保证操作过程在稳定条件下进行。产生不符合规律的现象时要及时观察研究，分析其原因，不要轻易放过。

②操作过程中设备及仪表发生问题，应立即按停车步骤停车，并报告指导教师。同时应自己分析原因供指导教师参考。未经指导教师同意不得自己处理。在指导教师处理问题时，学生应了解其过程，这是学习分析问题与处理问题的好机会。

③实验结束时应先将与本实验有关的水源、气源、仪表的阀门或电源关闭，然后切断电动机电源。

2. 气瓶安全使用知识

气瓶（又称高压钢瓶）是一种储存各种压缩气体或液化气体的高压容器。气瓶容积一般为40~60 L，最高工作压力（又称压强）为15 MPa，最低的也在0.6 MPa以上。瓶内压力很高，以及储存的某些气体本身易燃易爆，故应掌握气瓶的构造特点和安全知识，以确保安全。气瓶主要由筒体和瓶阀构成，其他附件还有保护瓶阀的安全帽、开启瓶阀的手轮以及运输过程减少振动的橡胶圈。在使用时，瓶阀口还要连接减压阀和压力表。各类气瓶的表面都应涂上一定颜色的油漆，其目的不仅是防锈，主要是能从颜色上迅速辨别气瓶中所储存气体的种类，以免混淆。常用的各类气瓶的颜色及其标识如表0-1所示。

表 0-1 常用的各类气瓶的颜色及其标识

气体种类	工作压力/MPa	水压试验压力/MPa	气瓶颜色	文字	文字颜色
氧	15.0	22.5	浅蓝色	氧	黑
氢	15.0	22.5	暗绿色	氢	红
氮	15.0	22.5	黑色	氮	黄
氦	15.0	22.5	棕色	氦	白
氨	3 (液)	6.0	黄色	氨	黑
氯	3 (液)	6.0	草绿色	氯	白
乙炔	3 (液)	6.0	白色	乙炔	红
压缩空气	15.0	22.5	黑色	压缩空气	白
二氧化碳	12.5 (液)	19.0	黑色	二氧化碳	黄
二氧化硫	0.6 (液)	1.2	黑色	二氧化硫	白

为了确保安全，在使用气瓶时，一定要注意以下几点。

(1) 当气瓶受到明火或阳光等热辐射的作用时，气体因受热而膨胀，使瓶内压力增大。当压力超过工作压力时，就有可能爆炸。因此，气瓶应放在阴凉，远离电源、热源（如阳光、暖气、炉火等）的地方，并加以固定。装有可燃性气体的气瓶必须与装有氧气的气瓶分开存放。

(2) 气瓶即使在温度不高的情况下受到猛烈撞击，或不小心中将其碰倒跌落，都有可能引起爆炸。因此，搬运气瓶时要戴上瓶帽、橡皮腰圈。要轻搬轻放，不要在地上滚动，避免撞击，防止摔倒，更不允许用金属器具敲打气瓶。

(3) 气瓶必须要安装好减压阀后使用。一般情况下，装有可燃性气体的气瓶上阀门的螺纹为反丝，装有不燃性或助燃性气体的气瓶上阀门的螺纹为正丝。各种减压阀绝不能混用。

(4) 开、关瓶阀时，一定要按规定方向缓慢转动。旋转方向错误或用力过猛会使螺纹受损，导致瓶阀冲脱而出，引起事故。关闭瓶阀时，不漏气即可，不要关得过紧。使用完毕或搬运气瓶时，关闭瓶阀，并装上瓶阀的安全帽。

(5) 氧气瓶的瓶阀、减压阀都严禁沾污油脂。在开启氧气瓶时还应特别注意手上、工具上不能有油脂，扳手上的油应用酒精洗去，待干后再使用，以防燃烧和爆炸。

(6) 每次使用气瓶之前都要在瓶阀附近做漏气检查。对于装有易燃、易爆气体的气瓶，除了保证严密不漏气，最好单独放置在远离实验室的隔离间内。

(7) 气瓶内气体不能完全用尽，应保持 0.05 MPa 以上的残留压力，以防重新灌气时发生危险。

(8) 气瓶需定期送交检验，合格的才能充气使用。

3. 实验室安全消防知识

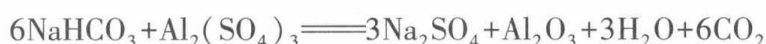
化工原理实验室内应准备一定数量的消防器材，实验操作人员应熟悉消防器材的存放位

置和使用方法，绝不允许将消防器材移作他用。实验室常用的消防器材包括以下六种。

(1) 沙箱。易燃液体和其他不能用水灭火的危险品，着火时可用沙子来扑火。它能隔断空气并起降温作用而灭火。但沙中不能混有可燃性杂物，并且要干燥。潮湿的沙子遇火后因水分蒸发，会使燃着的液体飞溅。沙箱存沙有限，实验室内又不能存放过多沙箱，故这种灭火工具只能扑灭局部小规模的火源。对于不能覆盖的大面积火源，因沙量太少而作用不大。此外，还可用不燃性固体粉末灭火。

(2) 石棉布、毛毡或湿布。这些器材适用于迅速扑灭火源区域不大的火灾，常用于扑灭衣服着火。其原理是隔绝空气达到灭火的目的。

(3) 泡沫灭火器。泡沫灭火器一般分为手提式泡沫灭火器、推车式泡沫灭火器和空气式泡沫灭火器。实验室多用手提式泡沫灭火器，它的外壳用薄钢板制成，内有一个玻璃胆，其中盛有硫酸铝。胆外装有碳酸氢钠和发泡剂（甘草精）。灭火液由 50 份硫酸铝和 50 份碳酸氢钠及 5 份甘草精组成。使用时将灭火器倒置，马上发生化学反应生成含 CO_2 的泡沫，化学反应的方程式为



此泡沫黏附在燃烧物表面上，形成与空气隔绝的薄层而达到灭火目的。它适用于扑灭实验室的一般火灾。对于油类着火，在开始时可使用，但不能用于扑灭电线和电气设备火灾。因为泡沫本身是导电的，这样会造成扑火人触电事故。

(4) 四氯化碳灭火器。此灭火器是在钢管内装入四氯化碳并压入 0.7 MPa 的空气，使灭火器具有一定的压力。使用时将灭火器倒置，旋开手阀即喷出四氯化碳。它是不燃液体，其蒸气比空气重，能覆盖在燃烧物表面使其与空气隔绝而灭火。它适用于扑灭电气设备的火灾。但使用时要站在上风侧（因四氯化碳有毒）。室内灭火后应打开门窗通风一段时间，以免中毒。

(5) 二氧化碳灭火器。二氧化碳灭火器的钢筒内装有压缩的二氧化碳气体，使用时旋开手阀，二氧化碳就能急剧喷出，使燃烧物与空气隔绝，同时降低空气含氧量。当空气中含有 12%~15% 的二氧化碳时，燃烧即停止。但使用时要注意防止现场人员窒息。

(6) 其他灭火器。干粉灭火器可扑灭易燃液体、气体、带电设备引起的火灾。卤代烷（1211）灭火器适用于扑救油类、电器类、精密仪器类等火灾，其在一般实验室内使用不多，对大量使用可燃物的实验场所应备用此类灭火器。

4. 实验室用水、用电安全

在化工原理实验中，使用循环水系统的场合较多。为了维护大型实验装置的水循环系统的正常运行，应保证循环水箱、循环水泵或高位水槽的严密、完好、畅通。如果发生跑、冒、滴、漏等故障，应及时进行维修。切忌将水渗漏或冲进电气设备。实验室中任何个人不得擅自拆卸、改装供水管道或安装取水龙头。实验完毕后，必须及时关好水闸、水龙头。

化工原理实验室中的电气设备较多，而且某些设备的电负荷也较大，因此，在接通电源之前，必须认真检查电气设备和电路是否符合规定要求，必须清楚整套实验装置的启动和停车操作顺序以及紧急停车的方法。实验室应安装空气开关，其作用是当通过开关的电流超过

一定值时，其自身会发热（利用双金属片受热弯曲的原理）导致开关里面的脱扣装置脱扣，从而切断电源，保护电路不因过大的电流而烧毁。实验室安全用电非常重要，对电气设备必须采取安全措施，同时，参与实验的操作人员也应当严格遵守以下有关操作规定。

(1) 进行实验之前必须了解室内总电闸与分电闸的位置，以便出现用电事故时能及时切断电源。

(2) 在对电气设备进行检查和维修时，必须切断电源方可作业。

(3) 带金属外壳的电气设备必须接地，并定期检查接点是否良好。

(4) 电气设备导线的接头应连接牢固，降低接触电阻。裸露的接头部分必须用绝缘胶布包好，或者套上绝缘套管。

(5) 所有电气设备应当保持干燥清洁。在其运行时不能用湿布擦拭，更不能有水落于其上。

(6) 电源或电气设备上的熔断器都应按规定电流标准使用，严禁私自加粗熔体或采用铜或铝丝代替。当熔断器熔断后，一定要查找原因，消除隐患，然后换上新的熔断器。

(7) 电热设备不能直接放在木制实验台上使用，必须用隔热材料垫架，以防引起火灾。

(8) 外接电源因故停电时，必须关闭实验使用的所有电闸，并将电压表、电流调节器等调至“零位状态”，以防止因突然供电，电气设备在较大功率下运行而损坏。

(9) 合电闸时动作要快，要合得牢。若合闸后发现异常声音或气味，应立即拉闸，进行检查。如发现设备上的熔断器损坏，应立刻检查带电设备是否有问题，切忌不经检查便在换上熔断器后就合闸，从而可能导致设备损坏。

(10) 离开实验室前，必须把本实验室的总电闸拉下。

四、实验室规则

实验室规则如下。

(1) 准时进入实验室，不得迟到，不得无故缺课。

(2) 遵守纪律，严肃认真地进行实验，实验室内不准吸烟，不准大声谈笑歌唱，不得穿拖鞋，不得进行与实验无关的活动。

(3) 在没有搞清楚仪器设备的使用方法前，不得启动仪器。实验时要得到指导教师许可后方可开始操作，与实验无关的仪器设备，不得乱摸乱动。

(4) 爱护仪器设备，节约水、电、气及药品，开闭阀门时不要用力过大，以免损坏阀门。仪器设备如有损坏，应立即报告指导教师，并于下课前填写破损报告单，由指导教师审核上报处理。

(5) 保持实验室及设备的整洁，实验完毕后将仪器设备恢复原状并做好现场清理工作，衣服应放在固定地点，不得挂在设备上。

(6) 注意安全及防火，启动电动机前，应观察电动机及其运动部件附近是否有人在工作，合电闸时，应慎防触电并注意电动机有无异常声音。精馏塔附近不准使用明火。

第一章 化工原理实验数据处理

第一节 实验数据的误差分析

1-1-1 误差分析在化工原理实验研究中的重要性

通过实验测量所得大批数据是实验的主要成果，但在实验中，由于测量仪表和人为观察等方面的原因，实验数据总存在一些误差，所以在整理这些数据时，首先应对实验数据的可靠性进行客观的评定。

误差分析的目的就是评定实验数据的精确性或误差，通过误差分析，可以认清误差的来源及其影响，并设法排除数据中所包含的无效成分，还可进一步改进实验方案。在实验中注意哪些是影响实验精确度的主要方面，细心操作，从而提高实验的精确性。

1-1-2 误差的基本概念

一、实验数据的误差来源及分类

误差是实验测量值（包括间接测量值）与真值（客观存在的准确值）之间的差别，可分为以下三类。

1. 系统误差

系统误差是由测量仪器不良（如刻度不准、零点未校），或测量环境不标准（如温度、压力、风速等偏离校准值），或实验人员的习惯和偏向等因素所引起的。这类误差在一系列测量中，大小和符号不变或有固定的规律，经过精确的校正可以消除。

2. 随机误差（偶然误差）

随机误差因一些不易控制的因素所引起的，如测量值的波动，肉眼观察欠准确等。这类误差在一系列测量中的数值和符号是不确定的，而且是无法消除的，但它服从统计规律，也是可以认识的。

3. 过失误差

过失误差主要因实验人员粗心大意，如读数错误、记录错误或操作失误所致。这类误差往往与正常值相差很大，应在整理数据时加以剔除。

二、实验数据的精确度

精确度与误差的概念是相反的，精确度高，误差就小；误差大，精确度就低。

要区别以下概念：测量中所得到的数据重复性的的大小，称精密度，它反映随机误差的大小，以打靶为例，图 1-1 (a) 中弹着点密集而离靶心（真值）甚远，说明精密度高，随机误差小，但系统误差大，即精密度高而正确度低；图 1-1 (b) 中弹着点分散在靶心附近，随机误差大，但系统误差较小，即精密度低而正确度较高；图 1-1 (c) 中弹着点密集在靶心附近，系统误差与随机误差均小，精确度高。精确度（或准确度）表示测量结果与真值接近程度，精确度高则精密度与正确度均高。

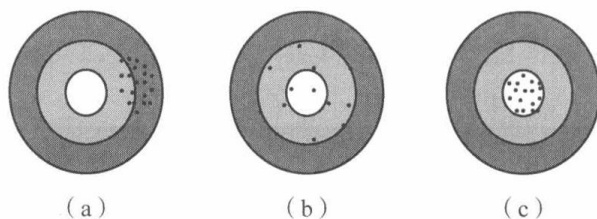


图 1-1 精密度和精确度的示意图

三、实验数据的真值与平均值

真值是待测物理量客观存在的确定值，由于测量时不可避免地存在一定误差，故真值是无法测得的。但是经过细致地消除系统误差和无数次测定，根据随机误差中正负误差出现概率相等的规律，测定结果的平均值可以无限接近真值。但是实际上测量次数总是有限的，由此得出的平均值只能近似于真值，称此平均值为最佳值。计算中可将此最佳值当作真值，或用“标准仪表”（即精确度较高的仪表）所测值当作真值。

化工中常用的平均值有以下 4 个。

(1) 算术平均值 x_m 。设 x_1, x_2, \dots, x_n 为各次测量值， n 为测量次数，则算术平均值为

$$x_m = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (1-1)$$

算术平均值是最常用的一种平均值，因为测量值的误差分布一般服从正态分布，可以证明算术平均值即为一组等精度测量的最佳值或最可信赖值。

(2) 均方根平均值 x_s 。

$$x_s = \sqrt{\frac{x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_n^2}{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n x_i^2}{n}} \quad (1-2)$$

(3) 几何平均值 x_c 。

$$x_c = \sqrt{x_1 x_2 \dots x_n} \quad (1-3)$$

(4) 对数平均值 x_l 。

$$x_l = \frac{x_1 - x_2}{\ln \frac{x_1}{x_2}} \quad (1-4)$$

对数平均值多用于热量和质量传递中，当 $x_1/x_2 < 2$ 时，可用算术平均值代替对数平均值，引起的误差不超过 4.4%。

四、误差的表示法

1. 绝对误差 d

某物理量在一系列测量中，某测量值与其真值之差称为绝对误差。实际工作中常以最佳值（即算术平均值）代替真值，测量值与最佳值之差称为残余误差，习惯上也称为绝对误差：

$$d = x_i - X \approx x_i - x_m \quad (1-5)$$

式中： d ——绝对误差；

x_i ——第 i 次测量值；

X ——真值；

x_m ——算术平均值。

若在实验中对物理量的测量只进行一次，则可根据测量仪器出厂鉴定书注明的误差，或取仪器最小刻度值（即分度值）的一半作为单次测量的误差。例如，某压力表注明精（确）度为 1.5 级，即表明该仪表最大误差为量程之 1.5%，若量程为 0.4 MPa，则该压力表最大误差为

$$0.4 \times 1.5\% \text{ MPa} = 0.006 \text{ MPa} = 6 \times 10^3 \text{ Pa}$$

又如，某天平的感量或名义分度值为 0.1 mg，则表明该天平的最小刻度或有把握正确的最小单位为 0.1 mg，即最大误差为 0.1 mg。

化工原理实验中最常用的 U 形管压差计、转子流量计、秒表、量筒、电压表等仪表，原则上均取其分度值为最大误差，而取其分度值的一半作为绝对误差计算值。

2. 相对误差 $e\%$

为了比较不同测量值的精确度，以绝对误差与真值（或近似地与算术平均值）之比作为相对误差：

$$e\% = \frac{d}{|X|} \approx \frac{d}{x_m} \times 100\% \quad (1-6)$$

在单次测量中，有

$$e\% = \frac{d}{x_i} \times 100\% \quad (1-7)$$

式中： d ——绝对误差；

$|X|$ ——真值的绝对值；

x_m ——算术平均值。

例 1-1 今欲测量大约 8 kPa（表压）的空气压力，实验仪表分别采用：（1）1.5 级，量程 0.2 MPa 的弹簧管式压力表；（2）标尺分度值为 1 mm 的 U 形管水银柱压差计；（3）标尺分度值为 1 mm 的 U 形管水柱压差计；求相对误差。

解（1）压力表。

绝对误差 $d = 0.2 \times 0.015 \text{ MPa} = 0.003 \text{ MPa} = 3 \text{ kPa}$ ；

相对误差 $e\% = 3/8 \times 100\% = 37.5\%$ 。

(2) 水银压差计。

绝对误差 $d=0.5 \times 1 \times 133.3 \text{ Pa} = 66.65 \text{ Pa}$ ，其中， $133.3 = 13.6 \times 9.8$ （即水银密度 \times 重力加速度）；

相对误差 $e\% = (66.65 \times 10^{-3} / 8) \times 100\% = 0.83\%$ 。

(3) 水柱压差计。

绝对误差 $d=0.5 \times 1 \times 9.8 \text{ Pa} = 4.9 \text{ Pa}$ ，其中，9.8 为水的密度 \times 重力加速度；

相对误差 $e\% = (4.9 \times 10^{-3} / 8) \times 100\% = 0.061\%$ 。

可见，用量程较大的仪表测量数值较小的物理量时，相对误差较大。

3. 算术平均误差 δ

算术平均误差是一系列测量值的误差绝对值的算术平均值，是表示一系列测量值误差的较好方法之一：

$$\delta = \frac{\sum_{i=1}^n |d|}{n} \quad (1-8)$$

4. 标准误差（均方误差） σ

在有限次测量中，标准误差可用下式表示：

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - x_m)^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n d^2}{n-1}} \quad (1-9)$$

标准误差是目前最常用的一种表示精确度的方法，它不但与一系列测量值中的每个数据有关，而且对其中较大的误差或较小的误差敏感性很强，能较好地反映实验数据的精确度，实验数据愈精确，其标准误差愈小。

1-1-3 实验数据的有效数字与记数法

一、有效数字

实验数据或根据直接测量值的计算结果，总是以一定位数的数字来表示。究竟取几位数才是有效的呢？这要根据测量仪表的精度来确定，一般应记录到仪表分度值的十分之一位。例如，某液面计标尺的分度值为 1 mm，则读数可以到 0.1 mm。若测定时液位高在刻度 524 mm 与 525 mm 的中间，则应记液面高为 524.5 mm，其中前 3 位是直接读出的，是准确的，最后 1 位是估计的，是欠准的或可疑的，称该数据有 4 位有效数字。若测定时液位高恰在 524 mm 刻度上，则数据应记作 524.0 mm，若记作 524 mm，则失去了 1 位精密度。

总之，有效数字中有且只有 1 位（末位）欠准数字。

由上述可知，液位高度 524.5 mm 中，最大误差为 $\pm 0.5 \text{ mm}$ 。

二、科学记数法

在科学和工程领域中，为了清楚地表达数据的精度，通常将数据写出并在第一位数后加小数点，而数值数量级由 10 的整数幂来确定，这种以 10 的整数幂来记数的方法称科学记数法。例如，0.008 8 应记为 8.8×10^{-3} ，88 000（有效数 3 位）记为 8.80×10^4 。

三、有效数的运算

(1) 加减法运算。各不同位数有效数相加减，其和或差的有效数字的位数等于其中位数最少的一个。例如，测得设备进出口的温度分别为 $65.58 \text{ }^\circ\text{C}$ 与 $30.4 \text{ }^\circ\text{C}$ ，则：

$$\textcircled{1} \text{ 温度和: } 65.58 \text{ }^\circ\text{C} + 30.4 \text{ }^\circ\text{C} = 95.98 \text{ }^\circ\text{C};$$

$$\textcircled{2} \text{ 温度差: } 65.58 \text{ }^\circ\text{C} - 30.4 \text{ }^\circ\text{C} = 35.18 \text{ }^\circ\text{C}。$$

结果中有两位欠准值，这与有效值规则不符，故第二位欠准数应舍去，按四舍五入法，其结果应为 $96.0 \text{ }^\circ\text{C}$ 与 $35.2 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

(2) 乘除法运算。乘积或商的有效数字的位数与各乘、除数中有效数字位数最少的相同。例如，测得管径 $D = 50.8 \text{ mm}$ ，其面积为

$$A = \frac{\pi}{4} D^2 = \frac{3.14}{4} \times 50.8^2 \text{ mm}^2 = 2.03 \times 10^3 \text{ mm}^2$$

注意： π 、 e 、 g 等常数的有效数字的位数可多可少，根据需要选取。

(3) 乘方与开方运算。乘方、开方后的有效数与其底数相同。

(4) 对数运算。对数的有效数字的位数与其真数相同。例如， $\lg 2.35 = 3.71 \times 10^{-1}$ ， $\lg 4.0 = 6.0 \times 10^{-1}$ 。

(5) 在 4 个数以上的平均值计算中，平均值的有效数字可比各数据中最少有效数字位数多一位。

(6) 所有取自手册上的数据，其有效数字按计算需要选取，但原始数据如有限制，则应服从原始数据。

(7) 一般在工程计算中取 3 位有效数字已足够精确，在科学研究中根据需求和仪器的可能，可以取到 4 位有效数字。

从有效数的运算规则可以看到，实验结果的精确度同时受几个仪表的影响时，则测试中要使几个仪表的精确度一致，采用一两个精度特别高的仪表无助于整个实验结果精度的提高，如过滤实验中，计量滤液体积的量具分度值为 0.1 L ，而用分度值为 $1/1000 \text{ s}$ 的电子秒表计时，测得 27.5635 s 中流过滤液 1.35 L ，计算每升滤液通过所需的时间为

$$t = 27.5635 / 1.35 \text{ s/L} = 27.6 / 1.35 \text{ s/L} = 20.4 \text{ s/L}$$

可见，用一个分度值为 0.1 s 的机械秒表精度就足够了。

1-1-4 间接测量值的误差传递

间接测量值由几个直接测量值按一定的函数关系计算而得，如雷诺数 $Re = d\rho v/\mu$ 就是间

接测量值，由于直接测量值有误差，因而间接测量值也必然有误差。怎样由直接测量值的误差计算间接测量值的误差呢？这就是误差的传递问题。

一、误差传递的基本方程

设有一间接测量值 y ，是直接测量值 x_1, x_2, \dots, x_n 的函数：

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (1-10)$$

对上式进行全微分，可得

$$dy = \frac{\partial f}{\partial x_1} dx_1 + \frac{\partial f}{\partial x_2} dx_2 + \dots + \frac{\partial f}{\partial x_n} dx_n \quad (1-11a)$$

如以 $\Delta y, \Delta x_1, \Delta x_2, \dots, \Delta x_n$ 分别代替上式中的 $dy, dx_1, dx_2, \dots, dx_n$ ，则得

$$\Delta y = \frac{\partial f}{\partial x_1} \Delta x_1 + \frac{\partial f}{\partial x_2} \Delta x_2 + \dots + \frac{\partial f}{\partial x_n} \Delta x_n \quad (1-11b)$$

上式即绝对误差的传递公式。它表明间接测量值或函数的误差为直接测量值的各项分误差之和，而分误差取决于直接测量误差 Δx_i 和误差传递系数 $\frac{\partial f}{\partial x_i}$ ，即

$$\Delta y = \sum_{i=1}^n \left| \frac{\partial f}{\partial x_i} \Delta x_i \right| \quad (1-11c)$$

相对误差的计算式为

$$\frac{\Delta y}{y} = \sum_{i=1}^n \left| \frac{\partial f}{\partial x_i} \cdot \frac{\Delta x_i}{y} \right| \quad (1-12)$$

上式中各分误差取绝对值，从最保险出发，不考虑误差实际上有抵消的可能，此时函数误差为最大值。

函数的标准误差为

$$\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{f^2}{x_i} \sigma_i^2} \quad (1-13)$$

式中： σ_i ——直接测量值的标准误差。

二、某些常用函数的误差

现将某些常用函数的最大绝对误差和最大相对误差列在表 1-1 中。

表 1-1 某些常用函数的误差传递公式

函数式	误差传递公式	
	最大绝对误差 Δy	最大相对误差 δ_r
$y = x_1 + x_2 + x_3$	$\Delta y = \pm (\Delta x_1 + \Delta x_2 + \Delta x_3)$	$\delta_r = \Delta y / y$
$y = x_1 + x_2$	$\Delta y = \pm (\Delta x_1 + \Delta x_2)$	$\delta_r = \Delta y / y$
$y = x_1 x_2$	$\Delta y = \pm (x_1 \Delta x_2 + x_2 \Delta x_1)$	$\delta_r = \pm \left(\left \frac{\Delta x_1}{x_1} + \frac{\Delta x_2}{x_2} \right \right)$