



面向二十一世纪课程教材

化工基础实验

冯亚云 主编 冯朝伍 张金利 副主编



化学工业出版社

面向二十一世纪课程教材

化工基础实验

冯亚云 主编

冯朝伍 张金利 副主编

化学工业出版社

· 北 京 ·

(京)新登字 039 号

图书在版编目 (CIP) 数据

化工基础实验/冯亚云主编. —北京: 化学工业出版社, 2000
面向二十一世纪课程教材
ISBN 7-5025-2648-X

I. 化… II. 冯… III. 化学工业-化学实验-高等学校-教材 IV. TQ016

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2000) 第 63841 号

面向二十一世纪课程教材

化工基础实验

冯亚云 主编

冯朝伍 张金利 副主编

责任编辑: 何 丽 徐世峰

责任校对: 顾淑云

封面设计: 田彦文

*

化学工业出版社出版发行

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

<http://www.cip.com.cn>

*

新华书店北京发行所经销

化学工业出版社印刷厂印刷

三河市东柳装订厂装订

开本 787×960 毫米 1/16 印张 26 $\frac{1}{4}$ 字数 447 千字

2000 年 2 月第 1 版 2000 年 2 月北京第 1 次印刷

印 数: 1—5000

ISBN 7-5025-2648-X/Q · 679

定 价: 29.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换

前 言

本书是在 1989 年以来公开出版的《化工基础实验技术》教材的基础上,经过近 10 年教学实践,进一步拓宽加深,引入新思路、新技术,为满足 21 世纪“化学工程与工艺”专业培养目标及新时期社会对人才培养所提出的新要求而编写的。

本书为化工类技术基础课的实验教材,强调实验研究全过程的多种能力和素质的培养与训练,增强创新意识,因此教材内容的涉及面比较广泛。着重介绍了①科学安排实验和定量评价实验结果的方法(第 1~3 章);②正确掌握和运用传统的和现代的实验方法和测试技术与技巧(第 4、5 章);③化工单元操作实验研究中的一些共性问题 and 疑难问题的处理方法以及一些通用的实验流程(第 6、7 章)。编写中力求概念清晰,层次分明,阐述简洁、易懂,使教材便于自学,使读者学会自我开拓获取知识和技能的本领;强调化工基础实验中的共性问题,拓宽基础,有较强的通用性,既可作为各高等院校的教材,又是科研和实验工作者较易学懂的参考书籍;选材中注意严谨和实事求是的态度,书中各章举例尽量采用经过核实的数据和自编通用程序,使本书更具实用性和可读性。

本书在组织编写人员上注意新老结合。这种组合可各自发挥优势,有利于新鲜知识和技术与多年从事实验工作所积累的经验或教训相结合,使教材更具生命力,编写内容更具新意。

本书由天津大学冯亚云主编,冯朝伍、张金利为副主编;由华东理工大学方图南教授、北京化工大学杨祖荣教授主审。全书共 7 章,各章执笔者:绪论冯朝伍、冯亚云;第 1 章郭翠梨、冯朝伍;第 2 章郭翠梨、张吕鸿;第 3 章张秀英、冯朝伍;第 4 章张金利、张秀英;第 5 章张吕鸿、张金利;第 6 章张金利;第 7 章胡瑞杰、冯朝伍;附录郭翠梨、冯朝伍。冯炜、胡彤宇老师进行了大部分文字和插图的打印工作,在此,对本书主审和在编写过程中给予热心帮助和支持的同志表示衷心感谢。

本书由于编写时间仓促,很多内容是作者的经验和见解,不妥之处,衷心地希望读者给予指教,使本教材日臻完善。

编者

1999 年 2 月

内 容 提 要

本书强调化工实验中的共性问题,突出了实验教材应具有的实践性和单元操作的工程性。编写中力求通过教材和实验操作培养实验者掌握综合运用理论知识、解决实际问题及正确表达实验结果的方法;开拓思路,掌握新的实验技术和方法,增强创新意识。选材严谨,实事求是,举例尽量采用实验中核实过的数据和计算程序,使本书更具有实用性和可读性。

全书共七章,包括实验误差的估算和分析;实验数据的处理;试验设计方法;化工实验参数测量方法;计算机测控与仿真技术;化工基础实验内容与流程;化工过程与设备的实验技术问题以及附录和部分练习题。

本书可作为高等院校化学工程与工艺及相关专业的技术基础实验课或化工原理实验课的实验教材或教学参考书,也可作为化工、石油、轻纺和食品、医药等部门从事科研、生产的技术人员的参考书。



C616719

目 录

绪论	1
第 1 章 实验误差的估算与分析	5
1.1 实验数据的误差	5
1.1.1 实验数据的测量	5
1.1.2 实验数据的真值和平均值	5
1.1.3 误差的定义及分类	7
1.1.4 误差的表示方法	8
1.1.5 精密度、正确度和准确度	11
1.2 实验数据的有效数字和记数法	12
1.2.1 有效数字	12
1.2.2 数字舍入规则	12
1.2.3 直接测量值的有效数字	13
1.2.4 非直接测量值的有效数字	14
1.3 随机误差的正态分布	15
1.3.1 误差的正态分布	15
1.3.2 随机误差的基本特性	15
1.3.3 正态分布数值表和图	15
1.4 系统误差的检验和消除	19
1.4.1 消除系统误差的必要性和重要性	19
1.4.2 系统误差的简易判别准则	19
1.4.3 消除或减小系统误差的方法	21
1.4.4 系统误差消除程度的判别准则	22
1.5 粗大误差的判别与剔除	23
1.5.1 粗大误差的判别准则	23
1.5.2 判别粗大误差注意事项	28
1.6 直接测量值的误差估算	28
1.6.1 一次测量值的误差估算	28
1.6.2 多次测量值的误差估算	30
1.7 间接测量值的误差估算	30
1.7.1 误差传递的一般公式	30

1.7.2	几何合成法一般公式的应用	31
1.7.3	误差分析的应用举例	33
第2章	实验数据处理	40
2.1	列表法	40
2.1.1	实验数据表的分类	40
2.1.2	设计实验数据表应注意的事项	40
2.2	图示法	41
2.2.1	坐标纸的选择	41
2.2.2	坐标分度的确定	43
2.2.3	其他必须注意的事项	44
2.3	经验公式的选择	45
2.3.1	经验公式的选择	45
2.3.2	常见函数的典型图形及线性化方法	46
2.4	图解法求经验公式中的常数	47
2.4.1	幂函数的线性图解	47
2.4.2	指数或对数函数的线性图解	49
2.5	实验数据的回归分析法	49
2.5.1	变量类型	49
2.5.2	回归分析法的含义和内容	50
2.5.3	线性回归分析法	51
2.5.4	非线性回归	64
2.5.5	逐步回归法	79
第3章	试验设计方法	93
3.1	正交试验设计方法	94
3.1.1	正交试验设计方法的优点和特点	94
3.1.2	因素之间的交互作用	96
3.1.3	正交表	98
3.1.4	正交试验的操作方法	102
3.1.5	正交试验结果的极差分析方法	103
3.1.6	正交试验结果的方差分析方法	107
3.1.7	正交试验结果的回归分析方法	117
3.1.8	正交试验法在化工基础实验中的应用举例	119
3.2	均匀试验设计方法	124
3.2.1	均匀试验设计方法的特点	124
3.2.2	均匀试验设计的几个问题	127

3.3 其他设计方法简介	134
3.3.1 单纯形优化法	134
3.3.2 双水平单纯形优化法	137
3.3.3 回归正交设计法	139
3.3.4 序贯试验设计	141
第4章 化工实验参数测量方法	144
4.1 测量技术基础知识	144
4.1.1 测量仪表的基本技术性能	144
4.1.2 非电量测量方法和传感器	147
4.1.3 仪表电路的抗干扰措施	150
4.2 压力差测量	155
4.2.1 压力计和压差计	156
4.2.2 压力差传感器	157
4.2.3 压差计的校验和标定	162
4.2.4 压差计安装和使用中的一些技术问题	164
4.3 流量流速测量技术	169
4.3.1 体积流量的测量	169
4.3.2 质量流量的测量	189
4.3.3 流速测量技术	194
4.3.4 流量计的检验和标定	198
4.4 温度测量技术	201
4.4.1 热电偶温度计	202
4.4.2 热电阻温度计	210
4.4.3 非接触式温度计	214
4.4.4 各种温度计使用范围的选择和比较	218
4.4.5 温度计的校验和标定	220
4.4.6 影响温度测量精度的因素和改善措施	222
4.5 成分分析简介	224
4.5.1 色谱法	224
4.5.2 阿贝折射仪	229
4.5.3 热导式气体分析仪	230
4.5.4 红外线气体分析仪	232
4.5.5 热磁式氧分析仪	234
4.5.6 氧化锆式氧分析仪	236
第5章 计算机测控与仿真技术	241

5.1	计算机采集与控制	241
5.1.1	概述	241
5.1.2	计算机数据采集和控制的构成	243
5.1.3	计算机数据采集和控制化工基础实验中的应用举例	244
5.2	集散型控制系统	250
5.2.1	集散型控制系统的产生	250
5.2.2	系统的组成	251
5.2.3	系统的基本功能	253
5.2.4	集散系统的优越性	254
5.3	智能仪表	255
5.3.1	智能仪表的结构和工作方式	255
5.3.2	智能仪表的主要优点	256
5.3.3	智能仪表的发展趋势	257
5.3.4	应用举例	257
5.4	计算机仿真的基本概念和步骤	260
5.4.1	概述	260
5.4.2	内容简介	261
5.4.3	化工过程模拟	264
5.4.4	间歇精馏过程的模拟计算	269
5.4.5	商用软件简介	273
第6章	化工基础实验内容与流程	280
6.1	化工过程基本实验	280
6.1.1	流体阻力测定实验	280
6.1.2	离心泵性能测定实验	281
6.1.3	流量计性能测定实验	282
6.1.4	传热系数及其准数关联式常数的测定	282
6.1.5	精馏塔实验	284
6.1.6	填料吸收塔实验	284
6.1.7	萃取塔实验	284
6.1.8	洞道干燥速率曲线测定实验	285
6.1.9	流化床干燥操作实验	286
6.2	设计型、研究型实验	287
6.2.1	正交试验法在过滤研究实验中的应用	287
6.2.2	均匀设计试验法在多相搅拌研究实验中的应用	288
6.2.3	离心泵计算机数据采集及控制实验	289

6.2.4	精馏塔计算机数据采集及过程控制实验	289
6.2.5	稳态传热的计算机仿真实验	290
6.2.6	温度测量技术与传热系数分布的测定	290
6.3	化工新技术实验	291
6.3.1	膜分离实验	291
6.3.2	变压吸附实验	292
6.3.3	产品成型实验(喷雾干燥实验)	292
6.3.4	动态膜过滤实验	293
6.3.5	离子交换实验	294
6.4	单元操作组合及流程型实验	294
6.4.1	多组分连续精馏分离实验	294
6.4.2	流程优化仿真实验	295
第7章	化工过程与设备的实验技术问题	296
7.1	实验装置设计技术	296
7.1.1	实验装置的总体设计	296
7.1.2	实验装置的零部件设计	298
7.2	过程参数测定内容	305
7.3	实验操作的一些问题	306
7.3.1	化工实验操作的安全问题	306
7.3.2	数据范围与数据点的数目和分布	306
7.3.3	传感器——显示器系统的使用	308
7.3.4	对传热传质操作的基本要求	309
7.3.5	何时读取数据	310
7.3.6	精馏塔的进料量	311
7.3.7	注意良好习惯的培养	312
7.4	实验数据的处理、分析和评价	313
7.4.1	引出结论要看误差	313
7.4.2	实验值、回归值和其他数据的比较	313
7.4.3	回归式间的相互比较	314
7.4.4	判断实验数据正确性的方法	314
7.5	实验中异常现象处理方法举例	316
7.5.1	流体流动过程	316
7.5.2	热量交换过程	327
7.5.3	质量交换过程	335
附录		346

附录 1	实验预习与报告的书写	346
附录 2	实验室的防火、用电等安全知识简介	351
附录 3	练习题	354
附录 4	相关系数检验表	362
附录 5	F 分布数值表	363
附录 6	正交多项式表	367
附录 7	计算程序	370
附录 8	常用正交表	391
附录 9	均匀设计表	400
参考文献		405

绪 论

时代发展对实验课的要求

世界已经进入知识经济的新时代。这个新时代的特点是：国家、集体和个人财富的来源主要是知识、信息和智力。在 21 世纪，人类获取知识和信息的途径除了书本（含电子音像书刊）和计算机“知识库系统”的软件外，主要就是从事科学实验。为了适应 21 世纪化学工业科技发展的要求，应该尽快地将化学、化工知识与计算机技术紧密地结合起来。化工基础实验课，在完成传统的各类单元操作实验的同时，应增设计算机数据采集实验、计算机过程控制实验和计算机仿真实验的教学内容。在有限的学时数下，运用新技术，不仅可完成单元设备的操作型实验，还可能引入简单的化工流程实验和设计型实验。这种将传统的在实验室内进行的“物理”（实物）实验和计算机仿真实验系统协调地结合（或配合），可以扩展实验内容、节省实验时间、提高综合素质和工作效率，而且对提高创造性和动手能力都是十分有利的。

实验课在人才培养中的作用

实验课从形式到内容，与课堂教学相比，都更为多样化、更生动活泼。实验前为了搞清楚将要使用的实验装置和仪器仪表的基本原理和操作方法，或在实验进行的过程中，以及处理实验数据和分析实验结果的时候，都会遇到各种各样急待思考和处理的问题。这些问题涉及的知识面很广，有化学、化工方面的，也有电工电子或数学、物理及机械问题等等，其中有理论问题也有实际问题。为了解决问题，既要动手，更要动脑，有益于分析和解决问题能力的提高。与课堂教学相比，在一门实验课的全过程之中，实验者在心理和思想素质方面接受检验的机会更多，更有利于提高素质水平。通过实验课进行素质教育和培养学生对于科学问题和所进行的工作的责任感，能与他人合作共事，办事有条有理，严肃认真，实事求是，勤奋好学，敢于创新。

实验课的任务（目的）

（1）在学习化工原理（上册——化工流体流动与传热，下册——化工传质与单元操作）课程的基础上，进一步了解和理解一些比较典型的已被或将被广泛应用的化工过程与设备的原理和操作。

（2）提供一个理论联系实际的机会。实习运用所学的关于化工原理等化学化工的理论知识去解决实验中遇到的各种实际问题，同时学习在化工领域内如何通过实验获得新的知识和信息。

(3) 进行化工实验基本技能的训练, 学习化工实验的基本方法和测量技术, 培养从事化工科学实验研究的能力。

(4) 培养发现问题、分析问题和解决问题的能力以及清楚正确表达实验结果、进行技术交流的能力。

(5) 培养科学的思维方法、科学态度和科学作风, 提高自身素质水平。

(6) 随着科技的发展, 不断引进新的化工技术和实验技术, 开扩眼界, 启发创新意识。

实验课的内容

本实验课(化工基础实验)由课堂讲授和实验两部分组成。总学时按 40 学时计, 讲课占 12 学时。教材中的大部分内容在上实验课的全过程中结合所做实验进行自学。在完成实验时, 除本教材外, 就具体实验装置还配有实验指导书。附录 3 中列出了若干章节的练习题。

由于各院校条件或课程学时所限, 开出的实验内容有所不同。从发展观点看, 拟逐步开出以下几类实验。

第一类: 基本实验(以配合《化工原理》课程教学为目的)。

①流动阻力测定; ②离心泵性能测定; ③流量计标定实验; ④传热实验(含温度测量技术); ⑤精馏塔实验; ⑥吸收塔实验; ⑦萃取塔实验; ⑧干燥实验。

第二类: 设计型与研究型实验。

①正交试验设计方法的应用(以过滤实验为例); ②均匀试验设计方法的应用(搅拌实验); ③计算机数据采集和控制(离心泵与精馏操作实验); ④计算机仿真(传热或精馏塔); ⑤温度测量技术实验(也可与第一类的传热实验合并)。

第三类: 化工新技术实验(以扩大知识面, 启发创新意识为目的)。

①膜分离; ②变压吸附; ③产品成型技术; ④动态膜过滤; ⑤离子交换。

第四类: 自主实验(以培养独立工作能力为目的)。例如将第一类精馏塔实验和第二类的计算机数据采集或仿真实验结合, 开出“组合型或流程型实验”, 试验内容或研究的小课题由自己设计或从实验室给出的题目中自选。

上列四类实验, 一、二类中的大部分实验在当前实验课中应尽力予以完成; 后两类实验可因材施教, 开设选修课或实行实验室开放, 自选时间进行实验, 也可以课外兴趣小组形式开出。

教材涉及的内容是上列各类实验中遇到的一些共性问题, 考虑到化工基础实验课是一门技术基础实验课, 所以介绍的内容均属基本原理、技术和技巧, 通用性较强。教材内容主要包括: ①估算和分析实验数据的误差; ②实验数据的一些通用的处理方法; ③介绍一些可提高实验工作效率的试验设计方法; ④实验方法和技巧, 比较详细地介绍了压力差、流量和温度的测量方

法与技巧，对计算机的数据采集、控制和仿真技术也作了扼要的阐述；⑤对化工单元操作过程及设备实验中的一些实验技术问题以及某些异常现象的处理方法进行讨论；⑥实验预习和实验报告的书写。

实验课的特点

(1) 本实验课程不附属于某一门理论课，因此不以印证和学好某一门理论课程为主要目的，而以培养高等化工科技人才应具有的一些能力和素质为主要目的。将能力和素质培养贯穿于实验课的全过程。①先讲授试验设计方法，后做试验设计应用实验，目的是培养进行试验方案设计的能力。②对流传热系数及其准数关联式测定实验，求 Nu 对 Re 和 Pr 的关联式时，假设 Re 、 Pr 的方次均为未知，应用多元回归方法处理实验数据，求关联式的系数和指数。目的是培养处理实验数据的能力。③在流动阻力测定实验或流量计性能测定实验的实验报告中，务必要对本实验的数据进行全面的误差估算和分析，培养对实验数据进行估算和分析的能力。④通过对实验报告的书写训练，培养正确书写实验报告的能力。⑤对实验原始数据表格和项目清单的准备情况以及实验数据记录等进行检查和签字，并要求学生做好实验的收尾工作和现场清洁卫生，目的是促使学生逐渐养成对待科学和工作严肃认真的科学作风及良好的习惯。⑥教材量大、讲授内容少，旨在实验过程，引导学生自学教材中的有关内容，培养自学的习惯和爱好，学会“自学”这种可以终身受益的学习方法。

(2) 本课程内容强调实践性、注意工程观念，并做到几个结合。①验证《化工原理》课程中最基本的理论与培养学生掌握实验研究方法、提高分析和解决实际问题的能力相结合。②单一验证性实验与综合性、设计性实验相结合，训练独立思考、综合分析处理问题的能力。③理论与实践密切结合。在教材各章节的举例，尽量采用化工基础实验的实测结果，这样做便于自学教材内容和将所学的理论知识运用于实验之中，引导学生举一反三，为毕业实践和今后处理工程实际问题打下基础。④传统的与近代的实验方法、测试手段及数据处理技术相结合。⑤注意当前和发展相结合。将完成实验教学基本内容与因材施教、拓宽加深实验教学内容和方法、培养创新精神相结合。⑥引入新的化工技术和科学的实验技术与当今化工行业研究热点内容相结合，以适应 21 世纪发展的要求。

实验课应注意的几个问题

(1) 实验预习。在实验之前要求将所有的问題都搞清楚是不可能的。但如果不预习，实验是做不好的。与课堂讲课不同，为开出实验课，所投入的人力、物力和财力是很大的，若实验后收获甚小，将是极大的浪费。尤其是本实验课工程性较强，有许多问题需事先考虑、分析，并做好必要的准备。因

此，实验前必须先预习。具体要求参见附录 1。

(2) 实验数据的记录。这个问题最重要的意义是让学生懂得并努力养成科学研究工作所必需的良好习惯。实验数据的记录不仅是写作报告和出版作品的原始资料，而且是可供查阅的永久记录。把与实验有关的每件事（数据、实验过程中的计算，情况说明、对于实验中出现的一些问题的看法以及图示等）直接记录在编有页码的记录本内，是实验室研究工作的标准做法。这种良好习惯是高素质的一种表现。具体记录要求和方法参见附录 1 和第 2 章 2.1 节。

(3) 关于实验报告。实验报告是对实验工作本身和实验工作对象进行评价的主要依据，是撰写科技论文和制定科技工作计划的重要依据和参考资料。从现实的状况看，较大一部分学生的实验报告中，存在的问题不容忽视。为此，本实验课对实验报告的书写进行强化训练，具体要求和方法参见附录 1。

(4) 关于化工实验室的安全问题。化工基础实验与前置实验课程不同，每一个实验相当于一个小型单元生产流程，电器、仪表和机械传动设备等组合为一体。初次见到和操作这类实验装置之前，应对该类实验室的防火、用电、防爆和防毒等安全知识作相应的了解，具体内容详见附录 2。

第 1 章 实验误差的估算与分析

通过实验测量所得的大批数据是实验的初步结果。但在实验中，由于测量仪器和人的观察等方面的原因，实验数据总存在一些误差，即误差的存在是必然的，具有普遍性的。因此，研究误差的来源及其规律性，尽可能地减小误差，以得到准确的实验结果，对于寻找事物的规律，发现可能存在的新现象是非常重要的。

误差估算与分析的目的是评定实验数据的准确性。通过误差估算与分析，可以认清误差的来源及其影响，确定导致实验总误差的最大组成因数，从而在准备实验方案和研究过程中，有的放矢地集中精力消除或减小产生误差的来源，提高实验的质量。

目前对误差应用和理论发展日益深入和扩展，涉及内容非常广泛，本章就化工基础实验中常遇到的一些误差基本概念与估算方法作一扼要介绍。

1.1 实验数据的误差

1.1.1 实验数据的测量

科学实验总是和测量紧密相联系的，这里主要讨论恒定的静态测量，一般分为两大类。可以用仪器、仪表直接读出数据的测量叫直接测量。例如：用米尺测量长度，用秒表计时间，用温度计、压力表测量温度和压强等。凡是基于直接测量值得出的数据再按一定函数关系式，通过计算才能求得测量结果的测量称为间接测量。例如：测定圆柱体体积时，先测量直径 D 和高度 H ，再用公式 $V = \pi D^2 H / 4$ 计算出体积 V ，此时 V 就属于间接测量的物理量。化工基础实验中多数测量均属间接测量。

1.1.2 实验数据的真值和平均值

1.1.2.1 真值

真值是指某物理量客观存在的确定值。对其进行测量时，由于测量仪器、测量方法、环境、人员及测量程序等都不可能完美无缺，实验误差难于避免，故真值是无法测得的，是一个理想值。在分析实验测定误差时，一般用如下方法替代真值。

① 实际值是现实中可以知道的一个量值，用它可以替代真值。如理论上证实的值，像平面三角形内角之和为 180° ；又如计量学中经国际计量大会决议的值，像热力学温度单位——绝对零度等于 -273.15K ；或将准确度高一级

的测量仪器所测得的值视为真值。

② 平均值是指对某物理量经多次测量算出的平均结果，用其替代真值。当然测量次数无限多时，算出的平均值应该是非常接近真值的。实际上，测量次数是有限的（比如 10 次），所得的平均值只能说是近似地接近真值。

1.1.2.2 平均值

在化工领域中常用的平均值有以下几种。

(1) 算术平均值 这种平均值最常用。设 $x_1, x_2, \dots, x_n$ 代表各次的测量值， n 代表测量次数，则算术平均值为

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

凡测量值的分布服从正态分布时，用最小二乘法原理可证明：在一组等精度的测量中，算术平均值为最佳值或最可信赖值。

(2) 均方根平均值 均方根平均值常用于计算气体分子的平均动能，其定义式为

$$\bar{x}_{\text{均}} = \sqrt{\frac{x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_n^2}{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n x_i^2}{n}} \quad (1-2)$$

(3) 几何平均值 几何平均值的定义式为

$$\bar{x}_{\text{几}} = \sqrt[n]{x_1 x_2 \dots x_n} \quad (1-3)$$

以对数表示为

$$\lg \bar{x}_{\text{几}} = \frac{\sum_{i=1}^n \lg x_i}{n} \quad (1-4)$$

对一组测量值取对数，所得图形的分布曲线呈对称时，常用几何平均值。可见，几何平均值的对数等于这些测量值 x_i 的对数的算术平均值。几何平均值常小于算术平均值。

(4) 对数平均值 在化学反应、热量与质量传递中，分布曲线多具有对数特性，此时可采用对数平均值表示量的平均值。

设有两个量 x_1, x_2 ，其对数平均值为

$$\bar{x}_{\text{对}} = \frac{x_1 - x_2}{\ln x_1 - \ln x_2} = \frac{x_1 - x_2}{\ln \frac{x_1}{x_2}} \quad (1-5)$$

两个量的对数平均值总小于算术平均值。若 $1 < \frac{x_1}{x_2} < 2$ 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%。

以上介绍的各种平均值，都是不同场合想从一组测量值中找出最接近