

高等教育规划教材

卓越 工程师教育培养计划系列教材
ZHUOYUE GONGCHENGSHI
JIAOYU PEIYANG JIHUA XILIE JIAOCAI

化工原理实验 及虚拟仿真 (双语)

Chemical Engineering Principle Experiments
and Virtual Simulation (Bilingual)

叶向群 单 岩 ◎ 主编

Xiangqun Ye Yan Shan Editor-in-chief



化学工业出版社

高等教育规划教材

卓越
工程师教育培养计划系列教材

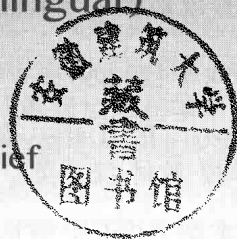
化工原理实验 及虚拟仿真

(双语)

Chemical Engineering Principle Experiments
and Virtual Simulation (Bilingual)

叶向群 单 岩 主编

Xiangqun Ye Yan Shan Editor-in-chief



化学工业出版社

· 北 京 ·

《化工原理实验及虚拟仿真(双语)》是根据大学化工及其相关专业化工原理实验教学的要求,在原有化工原理实验讲义的基础上编写完成的。其内容包括绪论,化工原理实验研究方法,实验数据的处理方法,化工原理虚拟仿真实验概述,以及对流体力学综合实验——管内流动阻力及离心泵特性曲线测定实验、对流传热系数的测定实验、恒压及真空过滤实验、填料塔吸收过程实验、筛板塔精馏实验、转盘及脉冲萃取实验、洞道式干燥特性曲线测定实验的实验原理、实验装置、操作步骤、虚拟仿真等方面进行了详细介绍。

随着现代教育技术的飞速发展,依托于虚拟现实、多媒体、人机交互、数据库和网络通信等技术,构建高度仿真的虚拟实验环境和实验对象,进行虚拟仿真实验教学已经成为实验教学的有效手段。针对教学的需要,本书配套提供了全新的立体教学资源库,内容丰富,形式多样,还配套提供教学工具,使教学效率显著提高。

《化工原理实验及虚拟仿真(双语)》可以作为本科院校化工原理实验、化工基础实验等课程的教材,并可供化工、化学等专业的技术人员参考。采用中英文双语编写,对内可用于双语实验教学,对外可用于国际交流生的实验教学。

图书在版编目(CIP)数据

化工原理实验及虚拟仿真(双语)/叶向群,单岩主编. —北京:化学工业出版社,2017.8

高等教育规划教材 卓越工程师教育培养计划系列教材

ISBN 978-7-122-30025-6

I. ①化… II. ①叶… ②单… III. ①化工原理-实验-高等学校-教材-汉、英 IV. ①TQ02-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 146314 号

责任编辑:杜进祥

文字编辑:丁建华 任睿婷

责任校对:王 静

装帧设计:关 飞

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 刷:三河市延风印装有限公司

装 订:三河市宇新装订厂

787mm×1092mm 1/16 印张 14 字数 346 千字 2017 年 10 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:36.00 元

版权所有 违者必究

前言

化工原理实验作为综合类大学化工类专业及其相关专业重要的专业基础课，是与工程实践相结合的必要条件，也是培养学生工程技术知识的一项重要实践。

化工原理实验作为一门重视实践操作、强调理论积累的历史悠久的课程，一直采用了理实一体的授课方法。但由于很多实验设备价格昂贵，实验操作复杂，并具有污染性、高危险性、高能耗、高成本、大空间等特点，为实验教学工作的开展增加了难度。

随着科技的发展，依托于虚拟现实、多媒体、人机交互、数据库和网络通信等技术，构建高度仿真的虚拟实验环境和实验对象并开展教学已经成为实验教学的趋势。在化工原理实验课程中引入虚拟仿真实验，能够显著地提高教学的效率与效果：

① 把现实中的实验操作搬到计算机上进行仿真训练，不仅起到很好的课前预习效果，而且还可大幅降低化工实验操作的危险性并节省成本，同时虚拟仿真实验软件还增加了实验操作的趣味性，达到了寓学于乐的目的；

② 虚拟仿真实验能打破时空限制，为随时随地开展实验教学创造条件；

③ 为教师提供优化的教学环境，并为学生提供个性化学习平台。

本书作为化工原理实验教材，注重理论与实践的结合、实验能力和素质的培养与训练。教师可要求学生通过虚拟仿真实验后自主完成实际实验操作，如根据实验内容自行设计完整的实验数据记录表，根据实验步骤提纲细化实验操作，通过查阅手册获取实验相关数据（如物性参数）、参照使用说明操作常规仪器，等等。适应现代教育技术和学科交叉综合的趋势，强调理论知识、虚拟仿真练习、自主实训操作相结合的“理虚实”一体化教学思路，从而改变以往教师手把手地教、学生拿着表格填数据的传统实验教学模式。

本书由叶向群和单岩主编，杨国成、金伟光、窦梅、南碎飞等参与编写，万文静和钮曹萍参与校核工作。由于编写时间仓促，编者的学识和经验有限，书中必然会存在需要进一步改进和提高的地方，殷切希望广大读者和同行批评指正，使本书日臻完善。

本书的编写过程中，得到浙大旭日科技有限公司在化工原理实验教学软件开发上的大力支持，作为首批国家级化工类虚拟实验中心建设的基础，校企联合配套开发了化工原理虚拟实验室，本书配套提供教学资源库及其云平台——学呗课堂（www.walkclass.com），读者可扫一扫本书封底的二维码下载学呗课堂 APP，注册后再扫一扫课程二维码即可在手机端快速获得相应的教学资源。

浙江中控教仪设备有限公司提供了部分实验教学装置，在此表示衷心的感谢。

浙江大学 Satmon John 博士对本书的英文内容作了校核，在此也深表感谢。

最后，谨向所有为本书提供大力支持的有关学校、企业和领导，以及在组织、撰写、研讨、修改、审定、打印、校对等工作中做出贡献的同志表示由衷的感谢。

编 者

2017 年 5 月 1 日

目录

绪论	1
一、化工原理实验的重要性及其目的	1
二、化工原理实验的特点	1
三、化工原理实验教学内容与教学方法	1
四、本课程化工原理虚拟仿真实验的特点	2
五、新型的化工原理实验教学方法	2
第一章 化工原理实验研究方法	4
一、直接实验法	4
二、量纲分析法	4
三、数学模型法	4
四、冷模实验法	5
第二章 实验数据的处理方法	6
一、实验数据误差分析	6
二、实验数据处理	15
第三章 化工原理虚拟仿真实验概述	22
一、软件运行环境	22
二、化工原理实验虚拟仿真系统启动	22
三、化工原理实验虚拟仿真菜单功能	23
第四章 流体力学综合实验——管内流动阻力测定实验	29
一、实验目的和要求	29
二、实验原理	29
三、实验装置和流程	30
四、虚拟仿真实验操作步骤	32

五、实验方法及步骤	34
六、实验报告	34
七、思考题	35

第五章 流体力学综合实验——离心泵特性曲线测定实验	36
一、实验目的和要求	36
二、实验原理	36
三、实验装置和流程	37
四、虚拟仿真实验操作步骤	38
五、实验方法及步骤	39
六、实验报告	39
七、思考题	39

第六章 对流传热系数的测定实验	40
一、实验目的和要求	40
二、实验原理	40
三、实验装置和流程	43
四、虚拟仿真实验操作步骤	45
五、实验方法及步骤	47
六、实验报告	48
七、思考题	48

第七章 过滤实验——恒压过滤、真空过滤	49
一、实验目的和要求	49
二、实验原理	49
三、实验装置和流程	51
四、虚拟仿真实验操作步骤	53
五、实验方法及步骤	57
六、实验报告	58
七、思考题	58

第八章 填料塔吸收过程实验	59
一、实验目的和要求	59

二、实验原理	59
三、实验装置和流程	62
四、虚拟仿真实验操作步骤	63
五、实验方法及步骤	66
六、实验报告	66
七、思考题	67

第九章 筛板塔精馏实验	68
一、实验目的和要求	68
二、实验原理	68
三、实验装置和流程	70
四、虚拟仿真实验操作步骤	72
五、实验方法及步骤	74
六、实验报告	75
七、思考题	75

第十章 萃取实验——转盘萃取、 脉冲萃取	76
一、实验目的和要求	76
二、实验原理	76
三、实验装置和流程	80
四、虚拟仿真实验操作步骤	82
五、实验方法及步骤	87
六、实验报告	88
七、思考题	88

第十一章 洞道式干燥特性曲线 测定实验	89
一、实验目的和要求	89
二、实验原理	89
三、实验装置和流程	91
四、虚拟仿真实验操作步骤	92
五、实验方法及步骤	95
六、实验报告	95
七、思考题	95

Chemical Engineering Principle Experiments and Virtual Simulation (Bilingual)	96
Abstract	97
Preface	98
Introduction	100
I Importance and purpose of chemical	

engineering principle experiment	100
II Characteristics of chemical engineering principle experiment	100
III Teaching contents and methods of chemical engineering principle experiment	100
IV Characteristics of virtual simulation chemical engineering experiment in this course	101
V New teaching method of chemical engineering principle experiment	102

Chapter 1 Research Methods of Chemical Engineering Principle Experiment	105
I Direct experimental method	105
II Dimensional analysis method	105
III Mathematical model method	106
IV Cold model experimental method ..	106

Chapter 2 Processing of Exper- imental Data	107
I Error analysis of experimental data	107
II Processing of experimental data	119

Chapter 3 Overview of Virtual Simulation Chemical Engineering Principle Experiment	128
I Software operating environment	128
II Virtual simulation system of chemical engineering principle experiment startup	128
III Menu function of virtual simulation chemical engineering principle experiment	129

Chapter 4 Comprehensive Fluid Mechanic Experiment— Determination of Flow Resistance in Pipe	136
--	------------

I	Experimental purposes and requirements	136
II	Experiment principle	136
III	Experimental apparatus and process	138
IV	Operation steps of virtual simulation experiment	139
V	Experimental method and procedure	142
VI	Experimental report	143
VII	Questions	143

Chapter 5 Comprehensive Fluid

Mechanic Experiment—

Determination of

Centrifugal Pump

Characteristic Curve

I	Experimental purposes and requirements	144
II	Experiment principle	144
III	Experimental apparatus and process	146
IV	Operation steps of virtual simulation experiment	146
V	Experimental method and procedure	147
VI	Experimental report	148
VII	Questions	148

Chapter 6 Determination Experiment of Convective Heat

Transfer Coefficient

I	Experimental purposes and requirements	149
II	Experiment principle	149
III	Experimental apparatus and process	153
IV	Operation steps of virtual simulation experiment	155
V	Experimental method and procedure	158
VI	Experimental report	159
VII	Questions	159

Chapter 7 Filtration Experiment

I	Experimental purposes and requirements	160
II	Experiment principle	160
III	Experimental apparatus and process	162
IV	Operation steps of virtual simulation experiment	164
V	Experimental method and procedure	169
VI	Experimental report	170
VII	Questions	171

Chapter 8 Packed Column Absorption

Experiment

I	Experimental purposes and requirements	172
II	Experiment principle	172
III	Experimental apparatus and process	175
IV	Operation steps of virtual simulation experiment	176
V	Experimental method and procedure	180
VI	Experimental report	181
VII	Questions	181

Chapter 9 Sieve-plate Column

Distillation Experiment ...

I	Experimental purposes and requirements	183
II	Experiment principle	183
III	Experimental apparatus and process	186
IV	Operation steps of virtual simulation experiment	186
V	Experimental method and procedure	191
VI	Experimental report	192
VII	Questions	192

Chapter 10 Extraction Experiment ...

I	Experimental purposes and requirements	193
---	--	-----

II	Experiment principle	193
III	Experimental apparatus and process	198
IV	Operation steps of virtual simulation experiment	200
V	Experimental method and procedure	205
VI	Experimental report	207
VII	Questions	207

Chapter 11	Experiment for the Determination of Drying Characteristic Curve in Tunnel Dryer	208
-------------------	--	------------

I	Experimental purposes and requirements	208
II	Experiment principle	208
III	Experimental apparatus and process	210
IV	Operation steps of virtual simulation experiment	212
V	Experimental method and procedure	215
VI	Experimental report	215
VII	Questions	215

参考文献	216
-------------------	------------

绪 论

一、化工原理实验的重要性及其目的

化工原理实验是化工类及其相关专业一门实践性很强的课程。不同于化学实验，化工原理实验是研究物料在工程规模条件下，发生物理或化学状态变化的工业过程及这类工业过程所用装置的设计和操作的一门技术课程。一个化工原理实验就是一个单元操作，实际化工生产过程就是由不同类型的单元操作构成。学生在化工原理实验课的学习过程中会遇到大量的工程实际问题，对于理工科学生来讲可以从实验过程中更实际、更有效地学到更多工程方面的原理及测试手段，可以发现复杂的工艺过程与数学模型之间的关系，也可以认识到对于一个看似复杂的过程，可以用最基本的原理来解释和描述。

化工原理实验不仅验证化工原理的基本理论、加深对课堂教学内容的理解，更为重要的还在于对未来的科技工作者进行实验方法、实验技能的基本训练，培养独立组织和完成实验的能力，为将来从事科学研究和解决工程实际问题打好基础。

二、化工原理实验的特点

化工原理实验变量多，涉及的物料千变万化，设备大小悬殊，面对的是复杂的实际问题 and 工程问题，对象不同，实验研究方法必然不同，本课程内容强调实践性和工程观念，并将能力和素质培养贯穿于实验课的全部过程。围绕化工原理最基本的理论，培养学生掌握实验研究方法，训练其独立思考、综合分析问题和解决问题的能力。

三、化工原理实验教学内容与教学方法

化工原理实验教学主要包括：实验基础知识教学和典型的化工单元操作实验。

实验基础知识教学部分主要讲述化工原理实验教学的目的是要求；实验装置和流程；实验原理；实验方法和步骤；实验报告等相关知识。

化工单元操作实验部分主要有：管内力学综合实验——管内流动阻力测定实验、离心泵特性曲线测定实验；对流传热系数的测定实验；过滤实验——恒压过滤、真空过滤实验；填料塔吸收实验；筛板塔精馏操作及效率测定实验；萃取塔（转盘塔/脉冲塔）操作实验；洞

道式干燥特性曲线测定实验。

化工原理实验教学一直采用了实验理论讲解和实验过程相结合的传统授课方法。传统教学方法具有明显的缺点：

① 很多实验设备价格昂贵，实验操作复杂，并往往具有污染性、高危险性（如有毒有害原料或试剂、高温高压或高速旋转等）、高能耗、高成本、大空间等特点，为实践教学工作的开展增加了难度。

② 通常是在教师完成理论授课后直接为学生安排实验，但理论与真实实验之间往往跨度很大，在一些操作复杂、设备不足、学生人数又多的情况下，学生往往会因为对实验没有充分的理解和准备而在现场实验中手足无措，导致成学习效率低下、浪费时间和资源，甚至会增加学生的心理负担。

③ 由于实验设备及场所有限制，往往需要把学生分成很多批次，很多学生的实验时间与理论授课时间间隔很长，不仅大幅度增加了教师的工作量，而且实验还没有起到应有的效果。

四、本课程化工原理虚拟仿真实验的特点

本课程虚拟仿真实验教学是依托虚拟现实、多媒体、人机交互、数据库和网络通信等技术，构建高度仿真的虚拟实验环境和实验对象并开展教学。化工原理虚拟仿真实验教学注重理工结合、教学与科研互动、校内与企业的衔接，并强调以学生为本，通过虚实串行、虚实并行、以虚替实和远程控制的多样性、开放式实验教学训练，既保证了学生的实验动手能力的训练，又充分利用虚拟仿真实验的特点，强化学生对实验过程的深入认识和对知识点的深入理解，使学生能从微观实验看到宏观效果、从教学实验中看到科研内涵、从校内看到校外生产实际，有效提升实验教学的效果，并实现化工类实验教学的绿色化，确保化工实验过程的安全性。

在化工原理实验课程中引入虚拟仿真实验手段，具有很显著的优点：

① 把现实中的实验操作搬到计算机上进行仿真训练，不仅可以起到很好的课前预习效果，还能降低化工实验操作的危险性，节省成本，同时虚拟仿真实验还增加了实验操作的趣味性，达到了寓学于乐的目的。

② 虚拟仿真实验不仅能打破时空限制，为随时随地开展实验教学创造便利条件，而且可以用虚拟仿真实验代替真实实验，避免或大幅度降低真实化工类实验所带来的各种危险。

③ 虚拟仿真实验为教师的教学活动提供了优化的教学环境。虚拟仿真实验中的教学资源内容丰富、形式多样、专业针对性强，为教师的备课提供了一个数字化平台。教师可以根据教学目标和学生的需要，设计更好的教学过程，达到最优化的课堂教学效果。

④ 虚拟仿真实验还为学生营造了数字化的学习环境，全面支持学生的自主化学习、研究性学习等多种学习模式。学生在数字化学习环境中，充分发挥自主性，进行探究、协作、自主和创造性学习，从而提高自身的创新精神、协作精神和实践能力。

五、新型的化工原理实验教学方法

1. “理虚实”一体化教学方法

“理虚实”一体化教学新模式是在理论授课后，引入虚拟仿真实验环节。将虚拟仿真实验作为实验前的准备和演练，为学生搭建了从理论到实际的桥梁，易学易用，是本课程“理

虚实”一体化教学思路的亮点所在。

① 在课前,向学生提供理论学习资源、虚拟仿真软件及学习任务。理论资源包括实验指导书、实验注意事项、实验操作视频等。通过个性化学习,让学生掌握相关理论知识,并了解相应实验设备的操作。

② 课堂中,首先进行理论测验和虚拟仿真软件的虚拟实验考核,以了解学生对理论知识和实验操作的掌握程度。只有通过理论测验,特别是虚拟实验考核的学生才能进行真实的实验。

③ 真实实验。观察实验现象并记录实验数据。由于虚拟实验与真实实验的操作步骤完全一致,不仅可以很好地解决真实实验的安全性问题,更可以让学生将精力集中于对实验及理论的深入理解。

如上述,“理虚实”一体化教学模式能否成功实施,关键在于如何保证学生能在课外进行理论学习和虚拟仿真实训,以及虚拟仿真实验的逼真程度。为此,通过校企联合开发了化工原理虚拟实验室以及云平台。

云平台的作用是实现资源共享、在线学习、教学管理等,实现资源的高效传播、任务发布、在线测验、在线使用虚拟仿真软件等。基于云平台的教学,不仅是对传统的教学方式的一种突破,也是互联网时代随时随地、人人都可参与的资源共享精神的一种表达。

所开发的虚拟仿真实验软件则同时具备教、练、考三个功能,“教”部分是通过视频演示实验操作流程,让学生初步了解正确的实验操作步骤。“练”部分是允许学生反复练习实验的流程,加强巩固。“考”的部分是考查学生对实验掌握程度的一个测验,它会自动记录学生在这个过程中产生的操作信息并对操作步骤的正确与否做出评价,有利于学生了解自己的知识掌握情况并进行查漏补缺;它还能自动记录实验数据,生成相应的 Excel 表格,清晰、整洁、准确,便于学生收集实验数据,完成实验分析和报告。

虚拟仿真软件还实现与云平台的无缝集成,即具备从 Web 页面启动软件、实验数据自动记录、虚拟实验操作在线考试、实验报告上传等快捷易用的功能,让虚拟仿真实验随时随地都能进行,让教师随时随地了解学生学习情况。

基于“理虚实”一体化的化工原理新型实验教学模式,极大地缓解了实验室资源的压力,不仅有助于节约教学成本,也大大提高了教学效果。

2. “理虚实”一体化教学实践

以“理虚实”一体化教学模式开展化工原理实验,首先是将教学资源上传到云平台,并通过云平台下达学习任务和设定学习目标,学生收到通知后再根据学习任务和目标,使用相关理论资源并进行虚拟仿真化工实验。学生完成虚拟仿真化工实验软件的练习和考试后,软件会自动保存实验操作过程和实验数据,并给相关的操作步骤评分,最终的数据将自动提交到云平台。教师登录云平台管理并统计学生的预习、实验操作情况。学生通过考核后再到真实的实验室进行实验,实验报告完成后,也提交到云平台,由教师进行在线批阅。

“理虚实”一体化教学模式深受学生欢迎。虚拟仿真化工软件能很好地帮助学生做好充足的课前准备、完成自主预习,短视频教学中展示的实验操作能帮助学生在实验前做好预习工作、熟悉实验设备;它不仅是很好的自学工具,甚至还可以为对实验原理的理解提供灵感和洞见,解决一些疑惑;加上其逼真的画面和三维漫游用户体验,是其在被访学生群体中受欢迎的主要原因。“理虚实”一体化教学可以使学生在无人指导的情况下完成课前预习,为没有实验条件的学生提供替代性的教学资源。

第一章

化工原理实验研究方法

化工原理是一门工程学科，它要解决的不单是过程的基本规律，而且面临着真实、复杂的生产问题——特定的物料在特定的设备中进行特定的过程。实际问题的复杂性不完全在于过程本身，而首先在于化工设备的复杂的几何形状和千变万化的物性。对于化学工程学科，除了生产经验总结以外，实验研究是学科建立和发展的重要基础。在长期的经验总结和实验研究的基础上，化工原理实验逐步形成的研究方法主要有直接实验法、量纲分析法、数学模型法和冷模实验法。

一、直接实验法

直接实验法即对被研究对象进行直接的实验，控制或模拟某些客观条件，以获取其相关的参数及规律。这是一种解决工程实际问题的最基本的方法，直接有效，所得到的结果也较为可靠，但这个方法也有较大的局限性。直接实验法得出的只是个别参数之间关系的规律，不能反映对象的全部本质，这些实验结果只能用到特定的实验条件和实验设备上，或推广到实验条件完全相同的现象。另外实验工作量大，耗时耗力，有时需要较高的投资。

二、量纲分析法

化工原理实验面对的是多变量影响的工程问题，需要借助于实验研究方法建立经验关系式，来导出理论公式。而研究多变量影响过程的规律，往往采用固定其他变量，依次改变其中某一个变量的网格法进行实验。如果变量数为 m 个，每个变量改变条件数为 n 次，那么所需要实验的次数为 $n \times m$ 次，涉及变量多，所需实验次数就会剧增，实验工作量必然很大。为了减少实验的工作量并使得到的实验结果具有一定的普遍性，采用量纲分析法这个化工原理广泛使用的实验研究方法来解决这类问题。

三、数学模型法

数学模型是用符号、函数关系将评价目标和内容系统规定下来，并把互相间的变化关系通过数学公式表达出来。所表达的内容可以是定量的，也可以是定性的，但必须以量的方式体现出来。因此，数学模型法的操作方式偏向于定量形式。基本特征：评价问题抽象化和

仿真化；各参数是由与评价对象有关的因素构成的；要表明各有关因素之间的关系。

数学模型法是在对研究的问题有充分认识的基础上，按以下主要步骤进行工作：

① 将复杂问题做合理又不过于失真的简化，提出一个近似实际过程又易于用数字方程式描述的物理模型；

② 对所得到的物理模型进行数学描述建立数学模型，然后确定该方程的初始条件和边界条件，求解方程；

③ 通过实验对数学模型的合理性进行检验并测定模型参数。

四、冷模实验法

冷模实验主要用于流动状态、传递过程等物理过程模拟研究，通过模拟实验结果去分析、推测实际过程。例如利用空气和水并加入示踪剂可进行气液传质的实验研究，为气液传质设备的设计和改造提供参数；利用空气和砂进行流态化的实验研究，为流化床反应器设计提供依据。因此利用空气、水、砂等模拟物料替代真实物料在工业装置结构尺寸相似实验装置中研究各种工程因素对过程影响规律的实验称为“冷模实验”。

冷模实验结果可推广应用于其他实际流体，将小尺寸实验设备的实验结果推广应用于大型工业装置，使得实验能够在物料种类上“由此及彼”，在设备尺寸上“由小及大”，直观、经济。用少量实验，结合数学模型法或量纲分析法，可求得各物理量之间的关系，使实验工作量大为减少。可进行在真实条件下不便或不可能进行的类比实验，减少实验的危险性。但是，冷模实验结果必须结合化学反应等特点，进行校正后才可用于工业过程的设计和开发。

第二章

实验数据的处理方法

通过实验测量所得大批原始数据是实验的主要成果，而后需要进行计算将最终的实验结果归纳成经验公式或者以图表的形式表示，以便进行比较分析。但在实验过程中，由于测量仪器、操作方法和人的观察等方面原因，数据总存在一些误差，所以在整理这些原始数据时，首先应对实验数据的可靠性进行客观的评定。

一、实验数据误差分析

误差分析的目的就是评定实验数据的准确性，通过误差分析，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。在实验中注意哪些是影响实验精确度的主要方面，还可以进一步改进实验方案，细心操作，从而提高实验的精确度。因此，对实验误差进行分析和估算，在评判实验结果和设计方案方面具有重要意义。

1. 真值与平均值

真值是待测物理量客观存在的确定值，也称理论值或定义值。通常一个物理量的真值是不知道的，需要去测定它。但严格来讲，由于测量仪器、测定方法、环境、人的观察力、测量的程序等，都不能做到完美无缺，故真值是无法测得的。为了使真值这个名词不致太玄虚，可以这样定义实验科学中的真值：在实验中，测量的次数无限多时，根据误差的分布定律，正负误差的出现概率相等，再经过细致地消除系统误差，将测量值加以平均，可以获得非常接近于真值的数值。但是实际上实验测量的次数总是有限的。用有限测量值求得的平均值只能是近似真值，常用的平均值有下列几种：

(1) 算术平均值

算术平均值是最常见的一种平均值。

设 $x_1, x_2, \dots, x_n$ 为各次测量值， n 代表测量次数，则算术平均值为

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

(2) 几何平均值

几何平均值是将一组 n 个测量值连乘并开 n 次方求得的平均值。即

$$\bar{x}_n = \sqrt[n]{x_1 x_2 \dots x_n} \quad (2-2)$$

(3) 均方根平均值

$$\bar{x}_s = \sqrt{\frac{x_1^2 + x_2^2 + \cdots + x_n^2}{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n x_i^2}{n}} \quad (2-3)$$

(4) 对数平均值

在化学反应、热量和质量传递中，其分布曲线多具有对数的特性，在这种情况下表征平均值常用对数平均值。

设两个量 x_1 、 x_2 ，其对数平均值

$$\bar{x}_m = \frac{x_1 - x_2}{\ln x_1 - \ln x_2} = \frac{x_1 - x_2}{\ln \frac{x_1}{x_2}} \quad (2-4)$$

应指出，变量的对数平均值总小于算术平均值。当 $x_1/x_2 \leq 2$ 时，可以用算术平均值代替对数平均值。

当 $x_1/x_2 = 2$ ， $\bar{x}_m = 1.443$ ， $\bar{x} = 1.50$ ， $(\bar{x}_m - \bar{x})/\bar{x}_m = 4.2\%$ ，即 $x_1/x_2 \leq 2$ ，引起的误差不超过 4.2%。

(5) 加权平均值

设对同一物理量用不同方法去测定，或对同一物理量由不同人去测定。即不等精度测量的每个测量值的可靠性

$$w = \frac{w_1 x_1 + w_2 x_2 + \cdots + w_n x_n}{w_1 + w_2 + \cdots + w_n} = \frac{\sum w_i x_i}{\sum w_i} \quad (2-5)$$

式中， $w_1, w_2, \cdots, w_n$ 表示各观察值的对应权数。各观察值的权数一般凭经验确定。

(6) 中位值

指将一组观测值按一定大小次序排列时的中间值，若观测次数为偶数，则中位值为正中两个值的平均值。中位值的最大优点是求法简单，而与两端的变化无关。中位值在设计上属于一种次序统计，只有观测值的分布为正常分布时，它才能代表一组观测值的最佳值。

以上介绍各平均值的目的是要从一组测定值中找出最接近真值的那个值。在化工实验和科学研究中，数据的分布较多属于正态分布，所以通常采用算术平均值。

2. 误差的性质及其分类

在任何一种测量中，无论所用仪器多么精密，方法多么完善，实验者多么细心，不同时间所测得的结果不一定完全一致，而有一定的误差和偏差。严格来讲，误差是指实验测量值（包括直接和间接测量值）与真值（客观存在的准确值）之差，偏差是指实验测量值与平均值之差，但习惯上通常不对两者加以区别。根据误差的性质及其产生的原因，可将误差分为系统误差、偶然误差和过失误差三种。

① 系统误差（恒定误差） 在相同的实验条件下，对同一量进行多次测量时，误差的数值大小和正负始终保持不变，或随着实验条件的改变按一定的规律变化的误差，称为系统误差。例如：刻度不准、零点未校准的测量仪器；实验环境的变化，如外界温度、压力、湿度的变化；实验操作者的习惯与偏向等。

由于系统误差是测量误差的重要组成部分，消除和估计系统误差对于提高测量准确度十分重要。一般系统误差是有规律的，其产生的原因往往是可知的，找出原因后，经过精心校

正或检查可以消除。

② 随机误差（偶然误差） 在相同条件下，测量同一物理量时，误差的绝对值时大时小，符号时正时负，没有一定的规律且无法预测，但这种误差完全服从统计规律，对同一物理量做多次测量，随着测量次数的增加，随机误差的算术平均值趋近于零。因此多次测量的算术平均值将接近于真值。

③ 过失误差 由于实验操作人员操作错误或人为失误所产生的误差。这类误差往往表现为与正常值相差很大，在数据整理时应予以剔除。

3. 误差的表示方法

利用任何量具或仪器进行测量时，总存在误差，测量结果不可能准确地等于被测量的真值，而只是它的近似值。测量的质量高低以测量精确度作指标，根据测量误差的大小来估计测量的精确度。测量结果的误差愈小，则认为测量就愈精确。

测量误差分为测量点和测量列（集合）的误差，它们有不同的表示方法。

(1) 测量点的误差表示方法

① 绝对误差 D 测量集合中某次测量值 x 与其真值 A_0 之差的绝对值称为绝对误差。它的表达式为：

$$D = |x - A_0| \quad (2-6)$$

即
$$x - A_0 = \pm D \quad x - D \leq A_0 \leq x + D \quad (2-7)$$

由于真值 A_0 一般无法求得，因而上式只有理论意义。常用高一级标准仪器的示值作为实际值 A 以代替真值 A_0 。由于高一级标准仪器存在较小的误差，因而 A 不等于 A_0 ，但总比 x 更接近于 A_0 。 x 与 A 之差称为仪器的示值绝对误差。记为：

$$d = |x - A| \quad (2-8)$$

与 d 相反的数称为修正值，记为：

$$C = -d \quad (2-9)$$

通过检定，可以由高一级标准仪器给出被检仪器的修正值 C 。利用修正值便可以求出该仪器的实际值 A 。

② 相对误差 衡量某一测量值的准确程度，一般用相对误差来表示。示值绝对误差 d 与被测量的实际值 A 的百分比值称为实际相对误差。记为：

$$E_r(x) = \frac{d}{A} \times 100\% \quad (2-10)$$

以仪器的示值 x 代替实际值 A 的相对误差称为示值相对误差。记为：

$$E_r(x) = \frac{d}{x} \times 100\% \quad (2-11)$$

一般来说，除了某些理论分析外，用示值相对误差较为适宜。

③ 引用误差 为了计算和划分仪表精确度等级，提出引用误差概念。其定义为仪表示值的绝对误差与量程范围之比。

$$\delta_A = \frac{\text{示值绝对误差}}{\text{量程范围}} \times 100\% = \frac{d}{X_n} \times 100\% \quad (2-12)$$

式中 d ——示值绝对误差；

X_n ——标尺上限值—标尺下限值。

(2) 测量列 (集合) 的误差表示方法

① 范围误差 范围误差是指一组测量中的最高值与最低值之差, 以此作为误差变化的范围。使用中常应用误差系数的概念。

$$K_1 = \frac{L}{\bar{x}} \quad (2-13)$$

式中 K_1 ——最大误差系数;

L ——范围误差 (一组测量中的最高值与最低值之差);

$\bar{x}$ ——算术平均值。

范围误差最大缺点是 K_1 只取决于两极端值, 而与测量次数无关。

② 算术平均误差 算术平均误差是各个测量点的误差的平均值。

$$\delta = \frac{\sum_{i=1}^n |d_i|}{n} \quad (2-14)$$

式中 n ——测量次数;

d_i ——测量值与平均值的偏差, $d_i = x_i - \bar{x}$ 。

算术平均误差是表示误差的较好方法, 它的缺点是无法表示出各次测量间彼此符合的情况。

③ 标准误差 标准误差亦称为均方根误差。其定义为

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n d_i^2}{n}} \quad (2-15)$$

标准误差对一组测量中的较大误差或较小误差感觉比较灵敏, 是表示精确度的较好方法。

式 (2-15) 适用无限次测量的场合。实际测量工作中, 测量次数是有限的, 则改用式 (2-16)

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n d_i^2}{n-1}} \quad (2-16)$$

标准误差 σ 不是一个具体的误差, 它的大小只说明在一定条件下等精度测量集合所属的每一个观测值对其算术平均值的分散程度。如果 σ 的值愈小, 则说明每一次测量值对其算术平均值分散度就愈小, 测量的精度就愈高, 反之精度就愈低。

在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最小刻度值为最大误差, 而取其最小刻度值的一半作为绝对误差计算值。

④ 或然误差 或然误差也称概差, 用符号 γ 表示, 它的意义为: 在一组测量中若不计正负号, 误差大于 γ 的观测值与误差小于 γ 的观测值将各占观测次数的 50%。

$$\gamma = 0.6745\sigma \quad (2-17)$$

或然误差近年来已逐渐被标准误差所替代。

上述的各种误差表示方式中, 不论是比较各种测量的精确度或是评定测量结果的质量, 均以相对误差和标准误差表示为佳, 而在文献中标准误差更常被采用。