

高等学校教材

化工原理实验及 单元仿真

HUAGONG YUANLI SHIYAN JI DANYUAN FANGZHEN

田维亮 主编
白红进 主审



化学工业出版社

化工原理实验及单元仿真

田维亮 主编
张红喜 孙宝昌 葛振红 副主编
白红进 主审



化学工业出版社

· 北京 ·

本书是化工原理及其相关课程的配套教材,注重培养学生综合素质,通过实验操作使学生掌握化工生产的基本操作技能。其内容包括绪论、化工原理实验的研究方法、实验数据的误差分析、实验数据处理、化工原理基本实验、化工原理综合实验、化工原理创新研究实验、化工单元仿真系统软件简介、化工单元仿真实验等。

本书可作为高等院校本科、专科化工及其相关专业的化工原理实验教材,也可供化学工程、环境工程、食品工程和生物化工等专业的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

化工原理实验及单元仿真/田维亮主编. —北京:化学工业出版社, 2014.6
ISBN 978-7-122-20320-5

I. ①化… II. ①田… III. ①化工原理-实验-高等学校-教材②化工单元操作-高等学校-教材 IV. ①TQ02

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 070420 号

责任编辑:杜进祥

文字编辑:刘砚哲

责任校对:吴 静

装帧设计:孙远博

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:北京市振南印刷有限责任公司

装 订:三河市宇新装订厂

787mm×1092mm 1/16 印张 10 字数 247 千字 2015 年 1 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:22.00 元

版权所有 违者必究

本书编写组

主 审：白红进

主 编：田维亮

副主编：张红喜 孙宝昌 葛振红

编 委：白红进 田维亮 张红喜

孙宝昌 葛振红 张越锋

吕喜凤 张 蕾 陈明鸽

FOREWORD 前言

当今，大学实验教学改革中，普遍开设综合型、设计型、研究（创新）型实验，这是对学生进行创新教育的重要思路 and 做法。化工原理实验是一门专业技术基础实验课，在培养化工类及相关专业的高级人才中起举足轻重的作用，是整个化工原理课程教学中一个重要的实践环节。通过实验教学使学生更深入地理解、掌握化工单元过程的规律性和基础理论，较为直观地树立起工程思想和观念，以期达到强化工程意识、培养科学实验能力的目的。

近年来，现代化化工厂逐渐实现自动化和半自动化的生产控制，大量的工作人员从繁杂的操作中解脱出来，这对现代化的员工也提出了更高的要求。目前，大型化工厂基本实现DCS系统中央集中控制，员工除了掌握基本的化工单元操作知识外，还需要熟悉计算机DCS系统控制的相关知识。因此，现代的化工单元操作实验教学也需要跟随社会发展的要求，进行教学改革。本教材以化工单元操作仿真教学为切入点，推进化工实验教学改革。

本书由塔里木大学白红进教授担任主审，田维亮老师担任主编（绪论、第一章、第二章、附录1、2），张红喜老师（第四章实验二至实验五）、北京化工大学孙宝昌老师（第三章、实验一）和葛振红老师（实验十五至实验二十）担任副主编，参加编写的还有张越锋老师（实验十至实验十三），吕喜凤老师（实验十四和第七章仿真实验软件简介），张蕾（实验六至实验九），陈明鸽老师（实验二十一至实验二十三，附录3~13）。非常感谢北京东方仿真软件技术有限公司覃杨工程师、尉明春工程师、杨杰工程师等提供技术资料。其他兄弟院校的老师也参与了编写讨论，并提出许多宝贵意见。在此，对本书在编写过程中给予热心帮助和支持的老师和同行，在此一并表示感谢。

编者水平和经验有限，疏漏在所难免，恳请读者和同行批评指正，使本书日臻完善。

编者

2014年4月

绪论	1
一、化工原理实验教学目的	1
二、化工原理实验的特点	2
三、化工原理实验教学内容与方法	2
四、化工原理实验要求	3
五、化工原理实验安全注意事项	6
六、思考题	7
第一章 化工原理实验的研究方法	8
一、直接实验法	8
二、因次分析法	8
三、数学模型法	11
四、直接实验法、数学模型法和因次分析法的比较	12
五、思考题	12
第二章 实验数据的误差分析	13
一、误差的基本概念	13
二、误差的表示方法	15
三、“过失”误差的舍弃	16
四、间接测量中的误差传递	17
五、误差分析在实验中的具体应用	19
六、思考题	23
第三章 实验数据处理	24
一、列表法	24
二、图示法	25
三、实验数据数学方程表示法	27
四、实验数据的回归分析法	33
五、思考题	37
第四章 化工原理基本实验	38
实验一 雷诺实验	38
实验二 离心泵特性曲线测定实验	40
实验三 流体流动阻力的测定实验	44
实验四 恒压过滤常数测定实验	49
实验五 气-气列管换热实验	53
实验六 干燥特性曲线测定实验	57
第五章 化工原理综合实验	62
实验七 填料塔吸收传质系数的测定实验	62
实验八 乙醇水溶液筛板塔精馏实验	65

实验九 乙醇正丙醇填料塔精馏实验	71
实验十 液液萃取塔实验	74
实验十一 膜分离法制备高纯水实验	78
第六章 化工原理创新研究实验	82
实验十二 超临界萃取实验	82
实验十三 超滤、纳滤、反渗透组合膜分离实验	87
实验十四 天然产物的提取、分离与清洁生产实验	91
第七章 化工单元仿真系统软件简介	95
一、系统安装使用环境	95
二、化工单元仿真实验内容	95
三、化工单元仿真实验系统的启动	95
四、化工单元仿真实验参数的选择	96
五、化工单元仿真实验菜单功能	98
六、系统操作质量评价系统	103
七、仿真实验系统的操作	107
八、思考题	107
第八章 化工单元仿真实验	108
实验十五 离心泵操作仿真实验	108
实验十六 液位控制系统操作仿真实验	111
实验十七 单级压缩机操作仿真实验	114
实验十八 多级压缩机操作仿真实验	117
实验十九 真空泵操作仿真实验	121
实验二十 列管式换热器操作仿真实验	126
实验二十一 精馏塔单元操作仿真实验	129
实验二十二 吸收解吸操作仿真实验	132
实验二十三 萃取塔操作仿真实验	137
附录	140
附录 1 干空气物理性质表	140
附录 2 湿空气的物理性质表	141
附录 3 水的物理性质表	142
附录 4 饱和水蒸气表	143
附表 5 1atm 下乙醇-水的平衡数据表	144
附表 6 乙醇-水溶液的比热容表	144
附表 7 乙醇-水溶液的汽化潜热表	145
附表 8 乙醇-水溶液相对密度与质量百分数关系表	145
附表 9 乙醇-水混合液在常压下气液平衡数据表	146
附表 10 乙醇-丙醇平衡数据表	146
附录 11 乙醇、正丙醇汽化热和比热容表	146
附录 12 二氧化碳在水中的亨利系数表	147
附录 13 实验报告格式	147
参考文献	151

绪 论

化工原理是研究物料在工业规模条件下,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学科,是运用自然科学的基本原理和工程实验方法来解决工业生产中相关领域的工程实际问题,所以化工原理的学习需要结合化工原理实验来完成。

化工原理实验是化工、制药、环境、食品、生物工程等院系或理工专业实践教学计划中的一门必修课程。与一般化学实验相比,化工原理实验属于工程实验范畴,具有工程特点。每个实验项目都相当于化工生产中的一个单元操作,通过实验能建立起一定的工程概念,同时,随着实验课的进行,会遇到大量的工程实际问题,对理工科专业的学生来说,可以在实验过程中更实际、更有效地学到更多工程实验方面的原理及测试手段,可以发现复杂的真实设备与工艺过程同描述这一过程的数学模型之间的关系,也可以认识到对于一个看起来似乎很复杂的过程,可以只用最基本的原理来解释和描述。因此,在实验课的全过程中,学生在创造性思维能力和动手能力方面都得到培养和提高,强化学生学习、认识、解决实际工程问题的能力,为将来的工作或深造打下坚实的基础。

一、化工原理实验教学目的

化工原理实验教学是化工原理教学的一部分,通过化工原理的实验教学,不但可以巩固和深化理论知识的学习,而且可以培养学生分析解决问题的能力、科学实验能力、科学思维方法等。学生只有通过一定量的实验训练,才能掌握各种实验技能,为将来的工作和科学研究打好坚实的基础。具体教学目的如下:

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的性能曲线和管道性能曲线,了解泵性能和管道性能的各种影响因素,从而帮助学生理解从书本上较难弄懂的概念。

2. 培养学生理论联系实际的学习方法

实验教学与理论教学相结合,对培养理工科学生的理论联系实际的能力尤为重要。结合化工原理课堂教学,有针对性地开设了一系列验证性、综合性和设计型创新实验,实现课堂教学与实验教学的互动,扩大了学生对课堂教学内容的感性认识,提高了学习兴趣,促进了学生对化工单元操作理论知识的理解和掌握,培养学生理论联系实际的能力和工程素养,提

高了学生的综合素质。

3. 培养学生从事科学研究的能力

理工科高等院校的毕业生必须具备一定的实验研究能力。实验能力主要包括：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，经过反复训练才能掌握各种实验能力，通过实验打下一定的基础，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技术开发。

4. 培养科学的思维方法、严谨的科学态度和良好的科学作风，增强工程意识、提高自身素质水平

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学习提高。

二、化工原理实验的特点

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过程。围绕化工原理课程中最基本的理论，实验部分开设有设计型、研究型 and 综合型创新实验，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。

本实验课程主要包括：化工原理实验基础知识，化工原理单元操作实验以及化工单元仿真实验三大部分。课程的特点在于将化工原理实验与计算机仿真、模拟及处理结合起来，针对化工原理实验和实验装置，引入了计算机多媒体仿真、数据模拟采集及处理，增加了实验相关素材的演示，并备有相应的多媒体教学软件。实验室在实验期间向学生完全开放，除完成实验教学基本内容外，可以进行现场预习和仿真实验，鼓励和支持对化工原理实验感兴趣的同学探索新的实验，培养学生学习化工原理的兴趣和科研创新精神。

本课程延续了传统实验的报告的模式，在创新设计开发实验的实验报告采用小论文形式撰写，这类型实验报告的撰写是提高学生写作能力、综合应用知识能力和科研能力的一个重要手段，可为毕业论文环节和今后工作所需的科学研究和科学论文的撰写打下坚实的基础。

三、化工原理实验教学内容与方法

1. 化工原理实验教学内容

化工原理实验教学内容主要包括：实验基础知识教学、典型的化工单元操作实验和化工单元仿真实验三大部分。

(1) 实验基础知识教学部分：本部分主要讲述化工原理实验教学的目的、要求和方法；化工原理实验的特点；化工原理实验的研究方法；实验数据的误差分析；实验数据的处理方法；实验数据处理；实验操作过程的基本要求等相关知识。

(2) 化工单元操作实验部分：典型化工单元操作实验包括三部分：

① 基本实验：流体流型演示实验、离心泵特性曲线测定实验、流体流动阻力实验、恒压过滤常数实验、气-气列管换热实验、干燥特性曲线测定实验。

② 综合实验：筛板塔精馏过程实验、液液萃取塔实验、填料塔吸收传质系数的测定、超滤、纳滤、反渗透组合膜分离实验。

③ 创新实验：膜分离法制备高纯水实验、天然产物的提取、分离与清洁生产。

(3) 化工单元仿真实验部分：化工单元仿真实验包括：离心泵操作仿真、单级压缩机操作仿真、液位控制系统操作仿真、列管式换热器操作仿真、精馏塔单元操作仿真、吸收解吸操作仿真、萃取塔操作仿真。

2. 化工原理实验教学方法

由于工程实验是一项技术工作，它本身就是一门重要的技术学科，有自己的特点和系统。为了切实加强实验教学环节，将实验课单独设课。化工原理实验工程性较强，有许多问题需事先考虑、分析，并做好必要的准备，因此必须在实验操作前进行现场预习和仿真实验。化工原理实验室实行开放制度，学生实验可以预约。

实验前，根据实验内容，由老师安排分组；每个实验均安排现场预习（包括仿真实验）；学生进入实验室，要检查相关实验的预习报告及预习情况，预习内容包括实验原理预习、实验流程和装置预习等。

实验结束后，每位学生要有一份指导教师签名的原始数据表，指导教师根据学生回答问题、现场操作情况、原始数据记录情况、实验纪律及作风等方面给学生操作部分成绩。

学生在实验结束一周内提交实验报告，实验报告应附有指导教师签名的原始数据表。指导教师根据实验报告的情况给学生报告分，缺一次实验或报告，最后不允许参加考试。

在课程学习结束时，由代课老师安排实验单元仿真考试，主要包括实验操作流程、注意事项、相关仪器设备的使用等，由北京东方仿真公司提供的软件，根据操作情况直接给出成绩。

期末笔试为闭卷考试，主要考核学生对工程实验研究方法掌握和应用的程度，包括以下几方面的内容：实验方法、实验原理、实验设计、实验操作、数据处理、实验分析、工程实践等几方面的内容。

化工原理实验成绩实行结构成绩制，分为四部分：

- ① 预习情况、现场提问、实验操作共占 15%，每项各占 5%。
- ② 实验报告质量占 20%。
- ③ 单元操作仿真考试成绩占 25%。
- ④ 期末考试成绩占 40%。

四、化工原理实验要求

化工原理实验主要包括：实验预习，实验操作与单元仿真，测定、记录和数据处理，实验报告等四个主要环节，各个环节的具体要求如下：

1. 预习环节

本实验课理论和工程实际联系很强，实验前需事先对实验进行了解、分析，并做好实验前的必要准备。为使学生达到实验目的中所提出的要求，仅靠实验原理部分是不够的，必须做到以下几点：

(1) 理论知识预习：认真阅读实验教材，复习课程教材以及参考书的有关内容，为培养能力，应试图对每个实验提出问题，带着问题到实验室现场预习。

(2) 现场预习：到实验室现场熟悉设备装置的结构和流程，明确操作程序与所要测定参数的项目，了解相关仪表的类型和使用方法以及参数的调整、实验测试点的分配等。

(3) 预习报告：实验目的、基本原理；实验装置及流程图；实验方案包括实验操作步骤、实验点分布等；做好数据记录表格，找出与实验相关的全部操作参数，画出便于记录的原始数据表格，列出其他需要记录的项目清单。

(4) 进行仿真实验和仿真实验测评。

2. 实验操作环节

一般以 2~4 人为一小组合作进行实验，实验前必须做好组织工作，做到既分工、又合作，每个组员要各负其责，并且要在适当的时候进行轮换工作，这样既能保证质量，又能获得全面的训练。实验操作注意事项如下：

实验前注意事项如下：

① 实验开始前，对泵、风机、压缩机、真空泵等设备，启动前先用手扳动联轴节，确认能否正常运转。

② 设备、管道上各个阀门的开、闭状态是否合乎流程要求。

③ 检查汽源、水源、电源等是否正常。

④ 设备、管道上仪表或控制盘是否正常显示。

完成上述检查后，合上电闸，使设备运转，开车实验，实验过程中注意事项如下：

(1) 实验设备的启动操作，应按教材说明的程序逐项进行，设备启动前必须检查。

(2) 操作过程中设备及仪表有异常情况时，应立即按停车步骤停车并报告指导教师，对问题的处理应了解其全过程，这是分析问题和处理问题的最好机会。

(3) 操作过程中应随时观察仪表指示值的变动，确保操作过程在稳定条件下进行。出现不符合规律的现象时应注意观察研究，分析其原因，不要轻易放过。

(4) 停车前应先将有关汽源、水源、电源关闭，然后切断电机电源，并将各阀门恢复至实验前所处的位置（开或关）。

3. 测定、记录和数据处理

(1) 确定要测定哪些数据 凡是对实验结果有关或是整理数据时必需的参数都应一一测定。原始数据记录表的设计应在实验前完成。原始数据应包括工作介质性质、操作条件、设备几何尺寸及大气条件等。并不是所有数据都要直接测定，凡是可以根据某一参数推导出或根据某一参数由手册查出的数据，就不必直接测定。例如水的黏度、密度等物理性质，一般只要测出水温后即可查出，因此不必直接测定水的黏度、密度，而应该改测水的温度。

(2) 实验数据的分割 一般来说，实验时要测的数据尽管有许多个，但常常选择其中一个数据作为自变量来控制，而把其他受其影响或控制的随之而变的数据作为因变量，如离心泵特性曲线就把流量选择作为自变量，而把其他同流量有关的扬程、轴功率、效率等作为因变量。实验结果又往往要把这些所测的数据标绘在各种坐标系上，为了使所测数据在坐标上得到分布均匀的曲线，这里就涉及实验数据均匀分割的问题。化工原理实验最常用的有两种坐标纸：直角坐标和双对数坐标，坐标不同所采用的分割方法也不同。其分割值 x 与实验预定的测定次数 n 以及其最大、最小的控制量 $x_{\max}$ 、 $x_{\min}$ 之间的关系如下：

① 对于直角坐标系：

$$x_i = x_{\min} \quad \Delta x = \frac{x_{\max} - x_{\min}}{n-1} \quad \Delta x_{i+1} = x_i + \Delta x \quad (0-1)$$

② 对于双对数坐标:

$$x_i = x_{\min} \quad \lg \Delta x = \frac{\lg x_{\max} - \lg x_{\min}}{n-1} \quad (0-2)$$

所以
$$\Delta x = \left(\frac{x_{\max}}{x_{\min}} \right)^{\frac{1}{n-1}} \quad x_{i+1} = x_i \cdot \Delta x \quad (0-3)$$

(3) 读数与记录

① 待设备各部分运转正常, 操作稳定后才能读取数据, 如何判断是否已达稳定? 一般是经两次测定其读数应相同或十分相近。当变更操作条件后各项参数达到稳定需要一定的时间, 因此也要待其稳定后方可读数, 否则易造成实验结果无规律甚至反常。

② 同一操作条件下, 不同数据最好是数人同时读取, 若操作者同时兼读几个数据时, 应尽可能动作敏捷。

③ 每次读数都应与其他有关数据及前一点数据对照, 看看相互关系是否合理? 如不合理应查找原因, 是现象反常还是读错了数据? 并要在记录上注明。

④ 所记录的数据应是直接读取的原始数值, 不要经过运算后记录, 例如秒表读数 1 分 23 秒, 应记为 1'23", 不要记为 83"。

⑤ 读取数据必须充分利用仪表的精度, 读至仪表最小分度以下一位数, 这个数应为估计值。如水银温度计最小分度为 0.1℃, 若水银柱恰指 22.4℃ 时, 应记为 22.40℃。注意过多取估计值的位数是毫无意义的。

⑥ 碰到有些参数在读数过程中波动较大, 首先要设法减小其波动。在波动不能完全消除情况下, 可取波动的最高点与最低点两个数据, 然后取平均值, 在波动不很大时可取一次波动的高低点之间的中间值作为估计值。

⑦ 不要凭主观臆测修改记录数据, 也不要随意舍弃数据, 对可疑数据, 除有明显原因, 如读错、误记等情况使数据不正常可以舍弃之外, 一般应在数据处理时检查处理。

⑧ 记录完毕要仔细检查一遍, 有无漏记或记错之处, 特别要注意仪表上的计量单位。实验完毕, 须将原始数据记录表格交指导教师检查并签字, 认为准确无误后方可结束实验。

(4) 数据的整理及处理

① 原始记录只可进行整理, 绝不可以随便修改。经判断确实为过失误差造成的不正确数据须注明后可以剔除不计入结果。

② 采用列表法整理数据清晰明了, 便于比较, 一份正式实验报告一般要有四种表格: 原始数据记录表、中间运算表、综合结果表和结果误差分析表。中间运算表之后应附有计算示例, 以说明各项之间的关系。

③ 运算中尽可能利用常数归纳法, 以避免重复计算, 减少计算错误。例如流体阻力实验, 计算 Re 和 λ 值, 可按以下方法进行。

例如: Re 的计算

$$Re = \frac{du\rho}{\mu} \quad (0-4)$$

其中 d 、 μ 、 ρ 在水温不变或变化甚小时可视为常数, 合并为 $A = \frac{d\rho}{\mu}$, 故有

$$Re = Au \quad (0-5)$$

A 的值确定后, 改变 u 值可算出 Re 值。

又例如, 管内摩擦系数 λ 值的计算, 由直管阻力计算公式

$$\Delta p = \lambda \frac{l}{d} \cdot \frac{\rho u^2}{2} \quad (0-6)$$

得
$$\lambda = \frac{d}{l} \cdot \frac{2}{\rho} \cdot \frac{\Delta p}{u^2} = B' \frac{\Delta p}{u^2} \quad (0-7)$$

式中常数 $B' = \frac{d}{l} \cdot \frac{2}{\rho}$

又实验中流体压降 Δp , 用 U 形压差计读数 R 测定, 则

$$\Delta p = gR(\rho_0 - \rho) = B''R \quad (0-8)$$

式中常数 $B'' = g(\rho_0 - \rho)$

将 Δp 代入上式整理为

$$\lambda = B'B'' \frac{R}{u^2} = B \frac{R}{u^2} \quad (0-9)$$

式中常数 B 为 $B = \frac{d}{l} \cdot \frac{2g(\rho_0 - \rho)}{\rho}$

仅有变量 R 和 u , 这样 λ 的计算非常方便。

④ 实验结果及结论用列表法、图示法或回归分析法来说明都可以, 但均需标明实验条件。列表法、图示法和回归分析法详见第三章实验数据处理。

4. 实验后总结

实验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。

化工原理实验具有显著的工程性, 属于工程技术科学的范畴, 它研究的对象是复杂的实际问题 and 工程问题, 鉴于化工原理的实验报告是实验测定的主要技术依据, 因此, 必须撰写实验报告。实验报告内容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方面, 应认真对待。

实验报告根据各个实验要求按传统实验报告格式或小论文格式撰写, 报告的格式详见附录。实验报告应按规定时间上交, 否则报告成绩要扣分; 不交实验报告者不允许参加期末笔试。

五、化工原理实验安全注意事项

(1) 学生在实验室内要认真遵守纪律, 遵守实验室守则以及其它规章制度, 听从教师指导, 不迟到不早退, 不得在实验室大声喧哗, 保持实验室内安静。

(2) 实验室内动力电、配电线路不得自行更动、超负荷用电或昼夜不断电。用电导线不能裸露, 实验时严禁裸线带电工作 (如带电接、拆线)。使用高压动力电时, 应穿戴绝缘胶鞋和手套, 或用安全杆操作; 有人触电时, 应立即切断电源, 或用绝缘物体将电线与人体分离后, 再实施抢救。

(3) 实验前要认真做好预习工作, 认真地阅读实验内容, 了解实验目的、要求、原理

以及实验步骤；实验前要进行现场预习，了解整个实验的实验流程，了解相关实验设备的各个装置、操作控制点、测试点、仪表使用方法、操作步骤及顺序等。实验前要各小组要组织制定好实验方案，包括实验流程、实验步骤、所需材料设备、实验检测手段、数据记录等，并针对实验方案，做好实验分工。

(4) 实验操作过程，学生一定要严格按照相关实验的操作规程进行操作，遵守相关仪器设备的操作规程，不得擅自变更操作步骤，操作前须经教师检查同意后方可接通电路和开车，实验过程中遇到问题不得擅自处理，应及时向老师汇报，老师处理后方可进行操作。操作中仔细观察现象，并会分析引起现象的原因，如实记录实验现象和数据。

(5) 实验后按照操作规程，按步骤关闭相关操作点，待老师检查无误后，向老师报告方可离开。并根据原始实验数据记录，按相关实验报告要求处理数据、分析问题及时作好实验报告。

(6) 爱护实验设备和实验仪器，爱护仪器设备、材料、工具等，实验药品和耗材要注意节约。

(7) 做好实验室的清洁工作，保持实验室整洁，废品、废物丢入垃圾箱内，恢复仪器设备原状，关好门窗，离开实验室前要确保水、电、气关闭。

(8) 易燃与有毒危险品要妥善保管，对废气、废物、废液的处理须严格按照有关规定执行，不得随意排放，不得污染环境。

(9) 违章操作，玩忽职守，忽视安全而酿成事故的，应及时向老师报告，对相关责任人要从严处理，所造成的损失按学校有关规定赔偿。

六、思考题

1. 化工原理的研究对象是什么？化工原理实验有哪些特点？
2. 如何学好化工原理实验这门课程？

第一章 化工原理实验的研究方法

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，而且面临着真实的、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。例如，过滤中发生的过程是流体的流动，其本身并不复杂，但滤饼提供的是形状不规则的网状结构通道。对这样的流体边界做出如实的、逼真的数学描述几乎是不可能的。采用直接的数学描述和方程求解的方法将十分困难。因此，探求合理的研究方法是发展这门工程学科的重要方面，然而，化工原理研究方法的研究，离不开化工原理实验。

化工原理实验属于工程实验，工程实验不同于基础课程的实验，后者采用的方法是理论的、严密的，研究的对象通常是简单的、基本的甚至是理想的，而工程实验面对的是复杂的实验问题和工程问题，对象不同，实验研究方法必然不一样，工程实验的困难在于变量多，涉及的物料千变万化，设备大小悬殊，困难可想而知。化学工程学科，如同其他工程学科一样，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。多年来，化工原理在发展过程中形成的研究方法有直接实验法、因次分析法和数学模型法三种。

一、直接实验法

直接实验法是根据研究的目的、任务，人为地制造或改变某些客观条件，控制或模拟某些自然过程。这是一种解决工程实际问题的最基本的方法，对特定的工程问题直接进行实验测定，所得到的结果也较为可靠，但它往往只能用到条件相同的情况，具有较大的局限性。例如过滤某种物料，已知滤浆的浓度，在某一恒压条件下，直接进行过滤实验，测定过滤时间和所得滤液量，根据过滤时间和所得滤液量两者之间的关系，可以作出该物料在某一压力下的过滤曲线。如果滤浆浓度改变或过滤压力改变，所得过滤曲线也都将不同，分别寻找它们的共同规律，来指导后续的实验。

二、因次分析法

对一个多变量影响的工程问题，为研究过程的规律，往往采用网格法规划实验，即依次固定其它变量，改变某一变量测定目标值。比如影响流体阻力的主要因素有：管径 d 、管长 l 、平均流速 u 、流体密度 ρ 、流体黏度 μ 及管壁粗糙度 ϵ ，变量数为 6，如果每个变量改变条件次数为 10 次，则需要做 10^6 次实验，不难看出变量数是出现在幂上，涉及变量越多，所需实验次数将会剧增，因此实验需要在一定的理论指导下进行，以减少工作量，并使得到的结果具有一定的普遍性。因次分析法是化工原理广泛使用的一种研究方法。

因次分析法 (Actor Analysis Method)，这是一种将各候选方案的客观因素和主观因素同时加权并加以比较的方法。基本理论是因次一致性原则和白金汉 (Buckingham) 的 π 定理。因次一致性原则是：凡是根据基本的物理规律导出的物理量方程，其中各项的因次必然

相同。白金汉的 π 定理是：用因次分析所得到的独立的因次数群个数，等于变量数与基本因次数之差。

因次分析法是将多变量函数整理为简单的无因次数群的函数，然后通过实验归纳整理出算图或准数关系式，从而大大减少实验工作量，同时也容易将实验结果应用到工程计算和设计中。使用因次分析法时应明确因次与单位是不同的，因次又称量纲，是指物理量的种类，而单位是比较同一种类物理量大小所采用的标准，比如：力可以用牛顿、公斤力、磅来表示。因次有两类：一类是基本因次，它们是彼此独立的，不能相互导出；另一类是导出因次，由基本因次导出。例如在力学领域内基本因次有三个，通常为长度 $[L]$ 、时间 $[\Theta]$ 、质量 $[M]$ ，其他力学的物理量的因次都可以由这三个因次导出并可写成幂指数乘积的形式。现设某个物理量的导出因次为 Q ： $[Q]=[M^a L^b \Theta^c]$ 式中 a 、 b 、 c 为常数。如果基本因次的指数均为零，这个物理量称为无因次数（或无因次数群），如反映流体流动状态的雷诺数就是无因次数群。

1. 因次分析法的具体步骤

- ① 找出影响过程的独立变量；
- ② 确定独立变量所涉及的基本因次；
- ③ 构造因变量和自变量的函数式，通常以指数方程的形式表示；
- ④ 用基本因次表示所有独立变量的因次，以及各独立变量的因次式；
- ⑤ 依据物理方程的因次一致性原则和 π 定理得到准数方程；
- ⑥ 通过实验归纳总结准数方程的具体函数式。

2. 因次分析法举例说明

以获得流体在管内流动的阻力和摩擦系数 λ 的关系式为例。根据摩擦阻力的性质和有关实验研究，得知由于流体内摩擦而出现的压力降 Δp 与 6 个因素有关，函数关系可写为：

$$\Delta p = f(d, l, u, \rho, \mu, \epsilon) \quad (1-1)$$

这个隐函数是什么形式并不知道，但从数学上讲，任何非周期性函数，用幂函数的形式逼近是可取的，所以化工上一般将其改为下列幂函数的形式：

$$\Delta p = K d^a l^b u^c \rho^d \mu^e \epsilon^f \quad (1-2)$$

尽管上式中各物理量上的幂指数是未知的，但根据因次一致性原则可知，方程式等号右侧的因次必须与 Δp 的因次相同；那么组合成几个无因次数群才能满足要求呢？由式(1-1)分析，变量数 $n=7$ （包括 Δp ），表示这些物理量的基本因次 $m=3$ （质量 $[M]$ 、长度 $[L]$ 、时间 $[\Theta]$ ），因此根据白金汉的 π 定理可知，组成的无因次数群的数目为 $N=n-m=4$ 。

通过因次分析，将变量无因次化。式(1-2)中各物理量的因次分别是：

$$\begin{aligned} \Delta p &= [ML^{-1}\Theta^2] & d &= l = [L] & u &= [L\Theta^{-1}] \\ \rho &= [ML^{-3}] & \mu &= [ML^{-1}\Theta^{-1}] & \epsilon &= [L] \end{aligned}$$

将各物理量的因次代入式(1-2)，则两端因次为：

$$ML^{-1}\Theta^{-2} = K L^a L^b (L\Theta^{-1})^c (ML^{-3})^d (ML^{-1}\Theta^{-1})^e L^f$$

根据因次一致性原则，上式等号两边各基本量的因次的指数必然相等，可得方程组：

$$\text{对基本因次 } [M] \quad d+e=1$$

$$\text{对基本因次 } [L] \quad a+b+c-3d-e-f=-1$$

$$\text{对基本因次 } [\Theta] \quad -c-e=-2$$

此方程组包括 3 个方程，却有 6 个未知数，设用其中三个未知数 b 、 e 、 f 来表示 a 、 d 、

c, 解此方程组。可得:

$$\begin{cases} a = -b - c + 3d + e - f - 1 \\ d = 1 - e \\ c = 2 - e \end{cases} \quad \begin{cases} a = -b - e - f \\ d = 1 - e \\ c = 2 - e \end{cases}$$

将求得的 a 、 d 、 c 代入式(1-2), 即得:

$$\Delta p = K d^{-b-e-f} l^b u^{2-e} \rho^{1-e} \mu^e \epsilon^f \quad (1-3)$$

将指数相同的各物理量归并在一起得:

$$\frac{\Delta p}{u^2 \rho} = K \left(\frac{l}{d} \right)^b \left(\frac{du \rho}{\mu} \right)^{-e} \left(\frac{\epsilon}{d} \right)^f \quad (1-4)$$

$$\Delta p = 2K \left(\frac{l}{d} \right)^b \left(\frac{du \rho}{\mu} \right)^{-e} \left(\frac{\epsilon}{d} \right)^f \left(\frac{u^2 \rho}{2} \right) \quad (1-5)$$

将此式与计算流体在管内摩擦阻力的公式

$$\Delta p = \lambda \frac{l}{d} \left(\frac{u^2 \rho}{2} \right) \quad (1-6)$$

相比较, 整理得到研究摩擦系数 λ 的关系式, 即

$$\lambda = 2K \left(\frac{du \rho}{\mu} \right)^{-e} \left(\frac{\epsilon}{d} \right)^f \quad (1-7)$$

或

$$\lambda = \Phi \left(Re \cdot \frac{\epsilon}{d} \right) \quad (1-8)$$

由以上分析可以看出: 在因次分析法的指导下, 将一个复杂的多变量的管内流体阻力的计算问题, 简化为摩擦系数 λ 的研究和确定。它是建立在正确判断过程影响因素的基础上, 进行了逻辑加工而归纳出的数群。上面的例子只能告诉我们: λ 是 Re 与 ϵ/d 的函数, 至于它们之间的具体形式, 归根到底还得靠实验来实现。通过实验变成一种算图或经验公式用以指导工程计算和工程设计。著名的莫狄 (Moody) 摩擦系数图即“摩擦系数 λ 与 Re 、 ϵ/d 的关系曲线”就是这种实验的结果。许多实验研究了各种具体条件下的摩擦系数 λ 的计算公式, 其中较著名的, 如适用于光滑管的柏拉修斯 (Blasius) 公式:

$$\lambda = \frac{0.3164}{Re^{0.25}}$$

其它研究结果可以参看有关教科书及手册。

因次分析法有两点值得注意:

① 最终所得数群的形式与求解联立方程组的方法有关。在前例中如果不以 b 、 e 、 f 来表示 a 、 d 、 c 而改为以 d 、 e 、 f 表示 a 、 b 、 c , 整理得到的数群形式也就不同。不过, 这些形式不同的数群可以通过互相乘除, 仍然可以变换成前例中所求得的四个数群。

② 必须对所研究的过程的问题有本质的了解, 如果有一个重要的变量被遗漏或者引进一个无关的变量, 就会得出不正确的结果, 甚至导致谬误的结论。所以应用因次分析法必须持谨慎的态度。

从以上分析可知: 因次分析法是通过将变量组合成无因次数群, 从而减少实验自变量的个数, 大幅度地减少实验次数, 此外另一个极为重要的特性是, 若按式(1-1) 进行实验时, 为改变 ρ 和 μ , 实验中必须换多种液体; 为改变 d , 必须改变实验装置 (管径)。而应用因次分析所得的式(1-5) 指导实验时, 要改变 $du \rho / \mu$ 只需改变流速; 要改变 l/d , 只需改变测量段的距离, 即两测压点的距离。从而可以将水、空气等的实验结果推广应用于其它流体, 将小尺寸模型的实验结果应用于大型实验装置。因此实验前的无因次化工作是规划一个实验的