

■ 普通高等教育“十二五”规划教材



山东省精品课程教材

化工原理

HUAGONG YUANLI

上册

王晓红 田文德 主编



化学工业出版社

普通高等教育“十二五”规划教材

山东省精品课程教材

化 工 原 理

上册

王晓红 田文德 主编



化学工业出版社

· 北 京 ·

本书共十四章，分上、下两册。上册以流体流动原理及应用、流体输送机械、固体颗粒流体力学基础与机械分离、传热原理及应用、蒸发及液体搅拌为重点；下册包括传质与分离过程概论、液体蒸馏、气体吸收、塔式气液传质设备、液-液萃取、固体干燥、膜分离技术及其他分离单元（结晶、吸附及离子交换）。每章章末均配有阅读资料、习题及思考题。

本书在关注学科最新发展动态的基础上，对单元操作基本概念及原理进行深入浅出的论述，同时着力突出培养工程能力的方法论。

本书可作为大专院校化工及相关专业（石油、制药、生物、环境、材料、自动化、食品、冶金等）的教材，也可供从事科研、设计和生产的技术人员参考。

图书在版编目（CIP）数据

化工原理. 上册/王晓红, 田文德主编. —北京: 化学工业出版社, 2011.6

普通高等教育“十二五”规划教材

山东省精品课程教材

ISBN 978-7-122-10800-5

I. 化… II. ①王…②田… III. 化工原理-教材
IV. TQ02

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 044997 号

责任编辑: 刘俊之

文字编辑: 冯国庆

责任校对: 陶燕华

装帧设计: 刘丽华

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 装: 三河市延风印装厂

787mm×1092mm 1/16 印张 20 $\frac{3}{4}$ 字数 561 千字 2011 年 6 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: 38.00 元

版权所有 违者必究

前 言

化工原理作为化学工程学科最重要的核心课程之一，是从基础理论课程过渡到工程专业课程的一个桥梁。本套教材是青岛科技大学化工原理教研室结合山东省精品课程建设编写的一套全新教材，分为上、下两册出版。根据化工类及相关专业人才培养方案、教学体系要求及不同学科发展需要，新教材的编写宗旨是力求知识结构系统完整，突出工程实践教育特色，介绍最新科技成果。

本套教材以动量、热量与质量传递理论为主线，突出工程学科的特点，系统而简明地阐述了典型过程工程单元操作的基本原理、工艺计算、主要设备的结构特点及性能、过程或设备的强化途径等。上册以流体流动原理及应用、流体输送机械、固体颗粒流体力学基础与机械分离、传热原理及应用、蒸发及液体搅拌为重点；下册包括传质与分离过程概论、液体蒸馏、气体吸收、塔式气液传质设备、液液萃取、固体干燥、膜分离技术及其他分离单元（结晶、吸附及离子交换）。

本套教材在编写过程中，注意吸收我校教学方面的丰富经验和体会，力争深入浅出、循序渐进、层次分明、论述严谨。同时注意引入过程工业领域不断更新的新理论、新技术、新设备等最新动态，并注意结合青岛科技大学的化工专业、橡胶专业、材料及机械等特色专业的最新科研成果，以便充分体现最新单元操作理念。

为了保证教学效果，每章章末均配有各类习题，同时提供特色阅读资料，其中包括计算机模拟技术在典型单元操作计算中的应用举例及针对典型工程实际问题的案例分析，以上内容在巩固学习基础的前提下，激发学习兴趣，让读者深切体会到“学有所用”的认同感。

本套教材可作为高等学校化工类及相关专业（化工、石油、制药、生物、环境、材料、自动化、食品、冶金等）的教材，也可供从事科研、设计和实际生产的科技人员参考。

与本套教材配套的《化工过程计算机设计基础》和《化工原理课程设计》也即将于2011年出版，可有效辅助化工原理课程的学习。

参加本书编写工作的人员是青岛科技大学化工学院化工原理教研室王晓红（绪论、流体流动原理及应用、流体输送机械、传热原理及应用、传质与分离过程概论、液体蒸馏、气体吸收、塔式气液传质设备、液液萃取）、田文德（固体颗粒流体力学基础与机械分离、蒸发、液体搅拌、固体干燥、膜分离技术、其他分离单元）。另外，该教研室的王立新、王许云、李红海、丁军委、王英龙、张俊梅及化工学院的张青瑞、段继海和杨霞老师均参与了本书的编写方案拟定和习题校核工作，对此，一并致以诚挚的谢意。

由于水平有限，书中不妥之处在所难免，恳请读者提出宝贵意见。

编 者
2010年12月

目 录

绪论	1	0.2.3 量纲分析	3
0.1 化工原理课程的基本内容及特点	1	0.3 化工原理的基本概念及定律	4
0.1.1 单元操作	1	0.3.1 平衡关系及过程速率	4
0.1.2 化工原理与其他课程的关系	2	0.3.2 质量衡算	4
0.1.3 化工原理课程的任务及特点	2	0.3.3 能量衡算	5
0.2 单位制与单位换算	3	0.4 化工原理课程的研究方法	6
0.2.1 单位制	3		
0.2.2 单位换算	3		
第1章 流体流动原理及应用	7		
1.1 流体的基本特性	7	1.4.3 机械能衡算	27
1.1.1 连续性假设	7	1.5 流体流动阻力	31
1.1.2 流体力学的基本概念	7	1.5.1 直管阻力计算通式	31
1.2 流体静力学及应用	7	1.5.2 圆形管内层流阻力计算	32
1.2.1 流体密度	8	1.5.3 圆形管内湍流阻力计算	33
1.2.2 流体静压强	8	1.5.4 非圆形管阻力计算	37
1.2.3 流体静力学基本方程	9	1.5.5 管路上的局部阻力	38
1.2.4 流体静力学基本方程的应用	11	1.5.6 管路系统总阻力计算	42
1.3 流体动力学基础	14	1.6 流体输送管路的计算	44
1.3.1 流量与流速	15	1.6.1 管路组成	45
1.3.2 稳态流动与非稳态流动	15	1.6.2 简单管路计算	46
1.3.3 牛顿黏性定律	15	1.6.3 复杂管路计算	49
1.3.4 流动型态与雷诺数	18	1.7 流体动力学在工程上的应用	51
1.3.5 流体在圆形管中的流动特性	19	1.7.1 流速的测量	51
1.3.6 边界层理论	21	1.7.2 流量的测量	53
1.3.7 流体在圆形管中的速度分布	22	阅读资料	59
1.4 流体流动的质量与能量衡算	25	习题	65
1.4.1 质量衡算	25	思考题	70
1.4.2 总能量衡算	25	符号说明	70
第2章 流体输送机械	71		
2.1 概述	71	2.3.1 概述	95
2.2 离心泵	71	2.3.2 离心式通风机	95
2.2.1 离心泵的主要部件和工作原理	71	2.3.3 离心式鼓风机与压缩机	98
2.2.2 离心泵的基本方程	73	2.4 其他类型输送机械	99
2.2.3 离心泵的主要性能参数与特性曲线	76	2.4.1 其他类型泵	99
2.2.4 离心泵的安装高度限制	82	2.4.2 其他类型气体输送机械	105
2.2.5 离心泵在管路中的运行	85	阅读资料	112
2.2.6 离心泵的类型与选用	90	习题	114
2.3 离心式气体输送机械	95	思考题	117
第3章 固体颗粒流体力学基础与机械分离	119	符号说明	117
3.1 固体颗粒特性	119	3.1.1 单一颗粒的特性	119

3.1.2 颗粒群的特性	120	3.4.7 过滤生产能力	151
3.1.3 粒径测量	121	3.5 固体流态化	153
3.2 固体颗粒在流体中运动时的阻力	124	3.5.1 固体流态化现象	153
3.3 沉降分离原理及设备	125	3.5.2 流化床的流体力学特性	155
3.3.1 重力沉降	125	3.5.3 流态化的工业应用	156
3.3.2 离心沉降	131	3.6 其他机械分离技术	163
3.4 过滤分离原理及设备	139	3.6.1 静电除尘	163
3.4.1 过滤操作原理	139	3.6.2 湿法捕集	164
3.4.2 过滤基本方程	141	3.6.3 惯性分离	166
3.4.3 过滤过程计算	142	阅读资料	166
3.4.4 过滤常数的测定	145	习题	169
3.4.5 过滤设备	146	思考题	171
3.4.6 滤饼洗涤	150	符号说明	172
第4章 传热原理及应用	173		
4.1 传热基本概念	173	4.5.1 蒸汽冷凝传热	195
4.1.1 传热在过程工业中的 应用	173	4.5.2 液体沸腾传热	198
4.1.2 传热基本方式	173	4.6 辐射传热	199
4.1.3 传热速率与热通量	173	4.6.1 辐射传热基本概念	199
4.1.4 稳态传热与非稳态传热	174	4.6.2 物体的辐射能力	200
4.1.5 冷热流体接触方式及 换热器简介	174	4.6.3 物体间的辐射传热	203
4.1.6 载热体及其选择	175	4.6.4 对流与辐射联合传热	205
4.2 热传导	176	4.7 间壁式换热器传热计算	206
4.2.1 热传导基本概念	176	4.7.1 间壁式换热简介	206
4.2.2 傅里叶定律	177	4.7.2 热量衡算	206
4.2.3 固体平壁稳态热传导	178	4.7.3 总传热速率方程	207
4.2.4 固体圆筒壁稳态热传导	181	4.7.4 总传热系数 K 的计算	209
4.3 对流传热	184	4.7.5 传热计算方法	211
4.3.1 对流传热机理和对流传热系数	184	4.7.6 换热器工艺计算	218
4.3.2 对流传热系数的影响因素	185	4.8 换热设备	222
4.3.3 对流传热系数的准数关联	186	4.8.1 间壁式换热器	222
4.4 流体无相变时的对流传热系数	188	4.8.2 强化传热技术	231
4.4.1 流体在管内强制对流传热	188	4.8.3 管壳式换热器的设计及选型	233
4.4.2 流体在管外强制对流传热	193	阅读资料	239
4.5 流体有相变时的对流传热系数	195	习题	243
		思考题	246
		符号说明	246
第5章 蒸发	248		
5.1 蒸发设备	248	5.3.1 多效蒸发的流程	257
5.1.1 循环型蒸发器	248	5.3.2 多效蒸发的计算	258
5.1.2 单程型蒸发器	250	5.3.3 多效蒸发的适宜效数	264
5.1.3 蒸发设备及技术新进展	252	5.4 蒸发过程的生产能力和生产强度	265
5.1.4 蒸发器选型	254	5.4.1 生产能力	265
5.2 单效蒸发	255	5.4.2 生产强度	265
5.2.1 溶液沸点及温度差损失	255	5.4.3 提高生产强度的途径	266
5.2.2 物料衡算与热量衡算	255	5.5 蒸发操作的其他节能措施	266
5.2.3 蒸发器的传热面积	256	5.5.1 抽取额外蒸汽	266
5.3 多效蒸发	257	5.5.2 二次蒸汽的再压缩	266

5.5.3 冷凝水的利用	267	阅读资料	270
5.6 蒸发应用	268	习题	272
5.6.1 烧碱增浓	268	思考题	273
5.6.2 废水处理	269	符号说明	274
5.6.3 生物溶液的蒸发	270		
第6章 液体搅拌	275		
6.1 概述	275	6.4.2 功率曲线	284
6.1.1 搅拌器分类	275	6.5 搅拌器的放大	286
6.1.2 混合效果的量度	279	6.6 其他混合设备	287
6.2 混合机理	280	6.6.1 静态混合器	287
6.2.1 均相液体的混合机理	280	6.6.2 射流混合	287
6.2.2 非均相液体的混合机理	281	6.6.3 管道混合器	287
6.3 搅拌器的性能	281	6.6.4 气流搅拌	288
6.3.1 搅拌器的特性	281	阅读资料	289
6.3.2 强化搅拌的措施	282	习题	290
6.4 搅拌功率	284	思考题	290
6.4.1 功率关联式	284	符号说明	290
附录	292		
参考文献	326		

下册

第1章 传质与分离过程概论
第2章 液体蒸馏
第3章 气体吸收
第4章 塔式气液传质设备
第5章 液液萃取
第6章 固体干燥
第7章 膜分离技术
第8章 其他分离单元

绪 论

0.1 化工原理课程的基本内容及特点

化工原理是化工、生物、冶金、食品等多个专业的一门重要的技术基础课，其主要任务是研究化工类型生产中各种物理操作问题的基本原理、典型设备的结构原理、操作性能和设计计算。化工原理是工程类专业学生在大学学习中的一个转折点，是从基础课程过渡到专业课程的一个桥梁，它的教学目的是初步建立起学生的工程观念。

为了清晰介绍化工原理课程的任务及特点，首先需要了解以下基本概念。

0.1.1 单元操作

过程工业是指对原料进行大规模加工处理，使其不仅在状态与物理性质上发生变化，而且在化学性质上也发生变化，最终得到具有特定物理化学性质产品的工业。过程涉及的范围相当广泛，如石油炼制、化工、冶金、制药等，在国民经济中占有十分重要的地位。

通常，一种产品的生产过程往往需要几个或几十个物理加工过程，而且各种生产工艺路线千差万别，但所发生的各种物理变化过程及操作原理基本相同，所用设备也可以大同小异。例如聚氯乙烯和纯碱生产中最后工序都要脱水、干燥；酿酒和乙烯生产中都要将液体混合物分开；制糖和制盐生产中都要将水溶液中的水分蒸发等。这些操作工序是过程工业中共有的，像物料的加热与冷却，即传热操作几乎在所有的工业领域，甚至在日常生活中都是离不开的。正是这些共有的操作工序，引起了人们的研究兴趣。20 世纪 20 年代提出了“单元操作”（unit operations）的概念。

单元操作在 20 世纪 50~60 年代曾称为“化工过程及设备”，80 年代也曾称为“化学工程”、“化学工程基础”。现在称为“化工原理”（principles of chemical engineering）。

单元操作以“三传”理论为基本依据，动量传递是研究动量在运动的介质中所发生的变化规律，如流体流动、沉降和混合等操作中的动量传递；热量传递是研究热量由一个地方到另一个地方的传递，如传热、干燥、蒸发、蒸馏等操作中存在这种传递；质量传递涉及物质由一相转移到另一不同的相，在气相、液相和固相中，其传递机理都是一样的，如蒸馏、吸收、萃取等操作中存在这种传递。

常用的单元操作已有几十种之多，典型的操作单元见表 0-1。

表 0-1 化工常用单元操作

单元操作名称	原理与目的	基本理论基础
流体输送 沉降 过滤 搅拌 流态化	输入机械能将一定量流体由一处送到另一处 利用密度差，从气体或液体中分离悬浮的固体颗粒、液滴或气泡 根据尺寸不同的截留，从气体或液体中分离悬浮的固体颗粒 输入机械能使流体间或与其他物质均匀混合 输入机械能使固体颗粒悬浮，得到具有流体状态的特性，用于燃烧、反应、干燥等过程	流体动力过程(动量传递)
换热 蒸发	利用温差输入或移出热量，使物料升温、降温或改变相态 加热以气化物料，使之浓缩	传热过程(热量传递)

续表

单元操作名称	原理与目的	基本理论基础
蒸馏 吸收 萃取 吸附 膜分离	利用各组分间挥发度不同,使液体混合物分离 利用各组分在溶剂中的溶解度不同,分离气体混合物 利用各组分在萃取剂中的溶解度不同分离液体混合物 利用各组分在吸附剂中的吸附能力不同分离气、液混合物 利用各组分对膜渗透能力的差异,分离气体或液体混合物	传质过程(质量传递)
干燥 增减湿 结晶	加热湿固体物料,使之干燥 利用加热或冷却来调节或控制空气或其他气体中的水汽含量 利用不同温度下溶质的溶解度不同,使溶液中溶质变成晶体析出	热、质同时传递过程
压缩 冷冻	利用外力做功,提高气体压力 加入功,使热量从低温物体向高温物体转移	热力过程
粉碎 颗粒分级	用外力使固体物质破碎 将固体颗粒分成大小不同的部分	机械过程

0.1.2 化工原理与其他课程的关系

虽然化工原理有时也叫做化学工程,实际上前者仅是后者的基础。就化学工程的发展来看,包括如下几个分支。①化工传递过程:在许多单元操作的发展过程中,人们逐渐认识到它们之间存在共同的原则,可进一步归纳为动量传递、热量传递和质量传递,总称为化工传递过程。②化工热力学:是在化学热力学和工程热力学的基础上形成的,主要研究多组分系统的温度、压力、各相组成和各种热力学性质间相互关系的数学模型以及能量(包括低品位能量)的有效利用问题。③化学反应工程:从化学反应设备的实际出发,深入分析其中的过程规律性,找出其共同点,逐渐形成了化学反应工程,其研究的核心问题是反应器中化学反应速率的快慢及其影响因素,从而能够正确选择反应器类型和操作条件,使化学反应实现工业化。④化工系统工程:主要研究化工过程模拟分析、综合和最优化等。过程综合指已知过程的输入和输出,确定过程的结构,即选择适宜的设备类型、流程结构和操作条件等;最优化指要求过程的性能指标达到某些最优数值,包含了过程最优设计、最优控制和最优管理等意义。

化学工程是直接支撑化学工业的主要工程技术,是重要的学科支持。化学工程经过近一个世纪的发展,其应用领域不但覆盖了几乎所有的过程工业,而且新的生长点正不断产生,如“生化工程”、“环境工程”等,其研究对象广泛而复杂,已远远地超出了化学工程的范畴,遍布于能源、资源、环境、运输、医药卫生、材料、农业以及生物等诸多领域。

0.1.3 化工原理课程的任务及特点

化工原理课程的主要任务是培养学生运用本学科的基础理论及基本技能,来分析解决化工生产实际问题的能力,包括:①选型,即根据生产工艺要求、物料特性及技术要求等,能合理选择恰当的单元操作及设备;②设计,对已选的单元操作进行设备设计和工艺计算;③操作,熟悉该单元的操作原理、操作方法,具备初步的分析及解决操作故障的能力。

化工原理课程突出特点是符号多、公式多、单位换算多。尤其是刚开始学习的时候总觉得没有头绪。尽管如此,只要下点工夫仍然可以把它学好。然而,要强调指出的是,化工原理面临着真实的、复杂的生产问题,即特定的物料,在特定的设备内,进行特定的过程,这就使问题的复杂性不完全在于过程本身,而首先在于过程工业设备复杂的几何形状和多变的物性。所以,研究工程问题的方法论和解决生产实际问题的能力,在化工原理的学习中上升到了显著的地位。

0.2 单位制与单位换算

0.2.1 单位制

凡是物理量均有单位，可分为基本单位和导出单位两类。在描述单元操作的众多物理量中，独立的物理量叫做基本量，其单位叫做基本单位，如时间、长度、质量等。不独立的物理量叫做导出量，其单位叫做导出单位，如速度、加速度、密度等。基本单位仅有几个，而导出单位由基本单位组成，数量很多。

基本单位加上导出单位称为单位制度。由于历史和地区的原因，出现了对基本单位的不同选择，因而产生了不同的单位制度。常用的单位制有绝对单位制（包括物理单位制和米制）、重力单位制（工程单位制）、国际单位制（SI 制）和英制。

长期以来，科技领域存在多种单位制度并用的局面。同一个物理量，有时在不同的单位制中具有不同的单位和数值，给计算和交流带来麻烦，且很容易出错。为了改变这一局面，1960 年 10 月，第十一届国际计量大会通过了一种新的单位制，叫国际单位制。该单位制共有七个基本单位，分别为长度、时间、质量、热力学温度、电磁强度、光强度和物质的量，外加平面角和立体角两个辅助单位。其优点是所有的物理量都可以用上述七个基本单位导出（有时要借助辅助单位），且任何一个导出量由上述七个基本单位导出时，都不需要引入比例系数。

1984 年，国内确定了统一实行以 SI 制为基础，包括由我国指定的若干非 SI 制在内的法定单位制，并规定，自 1991 年起除个别领域外不允许使用非法定单位制。本课程主要采用法定单位制，兼顾各单位制之间的换算。

0.2.2 单位换算

单位换算虽然简单，但即使是一个经验丰富的工程师，稍一马虎也会出错，所以必须认真对待。如 SI 制与工程单位制的换算。

(1) 质量与重力 在 SI 制中 1kg 质量的物体，若用工程单位制表示，该物体的重力为 1kgf。即同一物体用 SI 制表示的质量与用工程单位制表示的重力在数值上相等。所以在有关手册中查得工程单位制的重力，SI 制的质量可直接取其数值。但应注意，两者数值相等，但概念不同。质量是物体所含物质的多小，而重力是物体受地球引力的大小，一般认为地球附近的引力大小近似不变。

(2) 重力 在工程单位中重力是基本单位，但在 SI 制中重力是导出单位。因此，在工程单位制中重力为 1kgf 的物体，若用 SI 制表示，该物体的重力为 9.81N。

0.2.3 量纲分析

量纲与单位不是一个概念。如长度的单位有米、厘米、毫米、英尺和英寸等，为了明确长度的特性，可用量纲 L 表示。人们规定，用一个符号表示一个基本量，这个符号连同它的指数叫做基本量纲。而基本量纲的组合叫做导出量纲。基本量纲和导出量纲统称为量纲。各物理量均可以用量纲表示，如长度用 L，质量用 M，时间用 θ ，温度用 T，密度用 ML^{-3} 等。

在过程工业中，由于一些物理过程十分复杂，建立理论模型颇为困难。如果过程的影响因素已经明了，作为影响因素的物理量的相互关系，可进行某种程度的预测，这种预测方法称为量纲分析。量纲分析的依据是量纲一致性原则或 π 定理。所谓量纲一致性原则指，一个物理量方程的各项量纲必相同。所谓 π 定理指，量纲一致性的方程都可以化为无量纲数群的形式，方法是将方程中的各项同除以其中的任何一项即可，且有：

无量纲数群的数量 = 变量数 - 基本量纲的数量

若能找出过程的影响因素，使用量纲分析的方法将其归纳为无量纲数群表示的经验模型，用实验确定模型的系数和指数，这在化工原理上是可行的。这样的经验模型不仅关联式简单，而且可减少实验的工作量。

0.3 化工原理的基本概念及定律

要做一个合格的工程师是不容易的，过程工业的复杂性和影响过程的众多因素，使得问题的解决十分困难，一般的处理方法是：理论分析，实验研究，经验估计，权衡调整，要运用以上各类方法处理问题，首先从掌握以下概念入手。

0.3.1 平衡关系及过程速率

在化学工业的许多单元操作中，例如吸收、蒸馏等，平衡关系具有重要的意义。平衡关系是一种动态平衡，平衡条件可以用热力学法则来描述，而过程进行的方向和所能达到的极限都可以由平衡关系推知。因此，物理化学是化工原理的一个重要基础。

任何一个物系如果不是处在平衡状态，则必然会发生趋向平衡的过程，而过程变化的速率总是和它所处状态与平衡状态的差距（推动力）成正比，而与阻力成反比，即过程速率 = 过程推动力 / 过程阻力。推动力的性质取决于过程的内容，如传热的推动力是温度差，流体流动的推动力是压力差；与推动力相对应的阻力则与操作条件和物性有关。过程速率指明了过程进行的快慢程度，属于动力学在工程问题中的应用，动力学特征主要取决于过程的机理，而大部分过程的机理与动量、热量和质量传递密切相关，所以，传递过程是化工原理的另一个重要基础。

0.3.2 质量衡算

质量衡算的依据是质量守恒定律，即物质既不会产生也不会消失，参与任何化工过程的物料质量是守恒的。因此，进行质量衡算时，可以认为，进入与离开某一化工过程的物料质量之差，等于该过程中累积的物料质量，即：

$$\text{输入质量} - \text{输出质量} = \text{累积质量}$$

衡算的一般步骤是：首先确定衡算范围，具体包括微分衡算和总衡算。微分衡算取微元体为衡算范围，而总衡算的衡算范围可以是单个装置，也可以是一段流程、一个车间或一个工厂；其次是确定衡算对象和衡算基准；最后按如上的衡算通式进行计算。

当过程为稳态时，在衡算范围内累积的量等于零，即：

$$\text{输入质量} = \text{输出质量}$$

【例 0-1】 双效并流蒸发器是将待浓缩的原料液加入第一效中浓缩到某组成后由底部排出送至第二效，再继续浓缩到指定的组成，完成液由第二效底部排出。加热蒸汽也送入第一效，在其中放出热量后冷凝水排至器外。由第一效溶液中蒸出的蒸汽送至第二效作为加热蒸汽，冷凝水也排至器外。由第二效溶液中蒸出的蒸汽送至冷凝器中。

每小时将 5000kg 无机盐水溶液在双效并流蒸发器中从 12%（质量分率，下同）浓缩到 30%。已知第二效比第一效多蒸出 5% 的水分。试求：

(1) 每小时从第二效中取出完成液的量及各效蒸出的水分量；

(2) 第一效排出溶液的组成。

解：应按照物料衡算的步骤如下进行。

① 根据题意画出如本题附图所示的流程示意图，在图上用箭头标出物料的流向，并用数字和符号说明物料的数量和单位。

② 划出衡算范围。如图中虚线 1 及虚线 2 所示。在工程计算中，可以根据具体情况以一个生产过程或一个设备，甚至设备某一局部作衡算范围。凡穿越所划范围的流股，其箭头向内的为输入物料，向外的为输出物料。没有穿越所划范围的流股不参与物料衡算。

③ 定出衡算基准。对连续操作常以单位时间为基准；对间歇操作，常以一批物料（即一个操作循环）为基准。基准选得不当，会使计算过程变得复杂。基准选定后，参与衡算的各流股都按所选的基准进行计算。本题选 1h 为基准。

(1) 每小时从第二效中取出完成液的量及各效蒸出的水分量 在图中虚线 1 范围内列盐及总物料衡算，这里要说明两点：一是第一效蒸发器的加热蒸汽与冷凝水都是穿越虚线 1 的两个流股；它们进、出虚线 1 各一次，只与系统有热量交换而没有质量交换，故不参与衡算；二是第一效蒸出的 W_1 (kg/h) 的蒸汽送至第二效蒸发器放出热量后排至外界，故 W_1 应参与衡算。

盐的衡算

$$F_0 x_0 = B_2 x_2$$

总物料衡算

$$F_0 = W_1 + W_2 + B_2$$

将已知值代入以上两式：

$$5000 \times 0.12 = 0.3 B_2$$

$$5000 = W_1 + W_2 + B_2$$

由题知

$$W_2 = 1.05 W_1$$

联立以上三式，得：

完成液流量

$$B_2 = 2000 \text{ kg/h}$$

第一效蒸出的水分

$$W_1 = 1463 \text{ kg/h}$$

第二效蒸出的水分

$$W_2 = 1537 \text{ kg/h}$$

(2) 第一效排出溶液的组成 在图中虚线 2 范围内列盐及总物料衡算。

盐

$$F_0 x_0 = B_1 x_1$$

总物料

$$F_0 = W_1 + B_1$$

将已知值代入上两式：

$$5000 \times 0.12 = B_1 x_1$$

$$5000 = 1463 + B_1$$

联立以上两式解得

第一效排出溶液组成

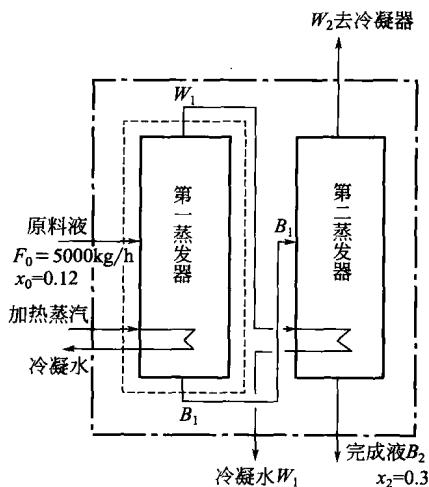
$$x_1 = 0.1696 = 16.96\%$$

0.3.3 能量衡算

过程工业中涉及的能量主要是机械能和热能，能量衡算的依据是能量守恒定律，即：

$$\text{输入系统总能量} - \text{输出系统总能量} = \text{系统累积能量}$$

对于稳态过程，系统内无能量累积，则：



【例 0-1】附图

F_0 为原料液的质量流量，kg/h； B_1 为第一效排出液流量，kg/h； B_2 为完成液流量，kg/h； x 为溶液中无机盐的质量分率；下标 0 表示原料液，下标 1、2 为蒸发器序号

输入系统总能量=输出系统总能量

其衡算步骤与质量衡算基本相同。

质量衡算和能量衡算均为常用的计算手段，将贯穿于本书的各个知识点中，在过程的开发设计、模拟优化、操作控制等工作中，都是必不可少的依据。

0.4 化工原理课程的研究方法

将基础理论研究成果应用到现代大型工业设备中，主要采用数学模型法，其实质是通过数学模型来放大和设计工业过程与设备。该方法的关键在于所建立的数学模型是否能够描述过程的本质问题，而对过程本质的认识又来源于实践，因此，实验仍然是数学模型法的主要依据。

数学模型大体可分为四类，即理论模型、经验模型、半经验半理论模型和人工智能模型。

(1) 理论模型 理论模型是指模型方程完全是在理论分析的基础上建立起来的数学表达式。尽管这类模型严格可靠，但面对复杂的工程问题常常是难以做到，只有那些过程十分简单，关系极其明确的少数操作才有可能属于此类。

(2) 经验模型 经验模型是指模型方程完全是靠回归实验数据得到的数学表达式，没有任何理论依据。这类模型的主要缺点是，从模型方程的形式上看不出所研究问题的内在规律，且受实验范围所限，外推性很差。但是，若其他类型的数学模型难以得到时，使用经验模型仍不失为一种补偿的方法。

(3) 半经验半理论模型 半经验半理论模型介于上述两种模型之间，是处理复杂工程问题的最有效、最常用的模型。这种模型的建立是理论与实验的结合，即：通过对所研究对象的过程机理进行理论分析，建立模型方程的表达式，进而通过实验确定模型参数。这样，可减少盲目性，增加可信性，外推性也有较大改善。

(4) 人工智能模型 模拟或部分模拟人类智能的数学模型称为人工智能模型。人工神经网络模型是典型的智能模型，它是由大量的神经元互连而成的网络，模拟人脑神经网络的学习和记忆功能是人工神经网络的核心任务。近些年来，人工智能模型的理论研究已取得了突破性进展并在解决某些复杂的工程问题中获得了成功。相信随计算机技术的发展和非经典数学方法的研究，人工智能模型必将广泛地应用到各种工程系统和生产系统中去。

本书主要介绍和应用经验模型、半经验半理论模型。

第 1 章 流体流动原理及应用

在过程工业生产中所处理的物料包括原料、半成品及产品等，大多数是流体。流体定义为不可能永久抵抗形变的物质，它包括液体和气体。生产中通常需要将流体从一个装置输送到另一个装置，使之进行后续的加工处理，流体的流动和输送是最普遍的过程单元操作之一。流体输送设备及流体流量测量仪表的选择，以及其他过程单元操作，例如传热或传质过程，都与流体的流动有关。流体的特性及流体流动的基本原理与规律是单元操作的重要基础。本章主要讨论流体的特性及流体在管路中流动过程的基本原理。

1.1 流体的基本特性

1.1.1 连续性假设

流体是由大量的彼此之间有一定间隙的单个分子所组成，而且各单个分子一直作着随机的、混乱的运动。如果以单个分子作为考察对象，那么，流体将是一种不连续的介质，所需处理的运动是一种随机运动，问题将是非常复杂的。

由于讨论流体流动问题时，着眼点不在于研究流体复杂的分子运动，而是流体宏观的机械运动，因此本章采用连续性假设，即把流体看成是由大量质点（又称分子集团）组成的连续介质，因为质点的大小与管道或设备的尺寸相比是微不足道的，但比起分子自由程却要大得多。这样，可以假定流体是由大量质点组成的，彼此间没有间隙，完全充满所占空间的连续介质，其物理性质及运动参数可用连续函数描述。

实践证明，该假设在绝大多数情况下是适合的，但是，对于高真空稀薄气体，连续性假定不能成立。

1.1.2 流体力学的基本概念

流体力学是研究流体在相对静止和运动时所遵循的宏观基本规律，同时研究流体与固体相互作用的学科，流体力学有许多分支，例如“水利学”及“空气动力学”等。“流体流动”是为“化工原理”课程需要而编写的流体力学最基础的内容，主要是研究流体的宏观运动规律，其介绍范围主要局限在流体静力学、流体在管道内流动的基本规律及流量测量等方面。

运用流体流动基本知识，可以解决管径的选择及管路的布置；估算输送流体所需的能量、确定流体输送机械的型式及其所需的功率；测量流体的流速、流量及压强等；为强化设备操作及设计高效能设备提供最适宜的流体流动条件。

1.2 流体静力学及应用

流体静力学是研究平衡状态下流体性质在受力作用下变化规律的科学，是流体力学的一个分支。流体的静力平衡规律在工程技术领域应用很多，例如流体贮存容器和输送管道的受力计算、压强的变化与测量、液位的测量和液封技术、压力传感器的设计等。

描述静态平衡下流体性质的物理量很多，常用的有密度、压强、温度等，因此在研究流体的静力平衡规律之前，必须了解表示流体性质的有关物理量。

1.2.1 流体密度

单位体积流体所具有的质量，称为流体密度。通常以 ρ 表示，单位为 kg/m^3 。

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1-1)$$

式中， m 为流体的质量， kg ； V 为流体的体积， m^3 。

不同流体的密度是不同的。对任何一种流体，其密度是压力与温度的函数。其中，压力对液体的密度影响很小，可忽略不计，故液体可视为不可压缩流体；而气体是可压缩性流体，其密度随系统压力明显变化。

温度对气体及液体的密度均有一定的影响，故在平时查取流体密度时应注明温度条件。

(1) 气体密度计算 因为气体具有可压缩性及膨胀性，其密度随温度、压力的变化较大。当温度不太低，压力不太高时，气体可按理想气体处理，根据理想气体状态方程：

$$pV = nRT = \frac{m}{M}RT$$

则
$$\rho = \frac{pM}{RT} \quad (1-2)$$

式中， n 为气体的物质的量， kmol ； p 为气体的绝对压力， kPa ； T 为气体的绝对温度， K ； M 为气体的千摩尔质量， kg/kmol ； R 为气体常数， $R = 8.314 \text{ kJ}/(\text{kmol} \cdot \text{K})$ 。

理想气体操作状态（压强 p ，温度 T ）下的密度 ρ 与标准状态 [压强 $p_0 = 1 \text{ atm}$ ($1 \text{ atm} = 101330 \text{ Pa}$)，温度 $T_0 = 273 \text{ K}$] 下的密度 ρ_0 之间可由下式进行换算：

$$\rho = \rho_0 \frac{p}{p_0} \times \frac{T_0}{T} \quad (1-3)$$

若气体按真实气体计算，则需引入压缩系数进行校正。

当计算气体混合物密度时，可假设混合物各组分在混合前后质量不变，取 1 m^3 混合气体为基准，则气体混合物密度可由下式计算。

$$\rho_m = \rho_1 y_1 + \rho_2 y_2 + \rho_3 y_3 + \cdots + \rho_n y_n \quad (1-4)$$

式中 ρ_m ——气体混合物的密度， kg/m^3 ；

$\rho_1, \rho_2, \cdots, \rho_n$ ——气体中各组分的密度， kg/m^3 ；

$y_1, y_2, \cdots, y_n$ ——各组分的体积分率，由于理想气体遵守道尔顿分压定律，所以混合气体中各组分的体积分率同时等于该组分的摩尔分率或分压比。

气体混合物的密度也可由式(1-2)计算，此时式中的千摩尔质量 M 应由混合气体的平均千摩尔质量 M_m 代替。

$$M_m = M_1 y_1 + M_2 y_2 + \cdots + M_n y_n \quad (1-5)$$

式中 $M_1, M_2, \cdots, M_n$ ——气体混合物中各组分的千摩尔质量， kg/kmol 。

(2) 液体密度计算 对于纯组分液体密度，可查取附录或有关的工艺及物性手册。

液体混合物密度的计算，可取 1 kg 混合物为基准，并假定混合前、后总体积不变。液体混合物组成常用组分的质量分率表示，故液体混合物密度 ρ_m 可表示为

$$\frac{1}{\rho_m} = \frac{x_1}{\rho_1} + \frac{x_2}{\rho_2} + \cdots + \frac{x_n}{\rho_n} \quad (1-6)$$

式中 $x_1, x_2, \cdots, x_n$ ——液体混合物中组分的质量分率；

$\rho_1, \rho_2, \cdots, \rho_n$ ——液体混合物中各组分的密度， kg/m^3 。

1.2.2 流体静压强

静止流体单位面积上所承受的垂直作用力，称为流体的静压强，简称压强，以符号 p

示之，而流体的压力 P 称为总压力。在静止流体内部某点任取一个微元面积 dA ，令垂直作用于该微元面积上的压力为 dP ，则该点的静压强可表示为：

$$p = \frac{dP}{dA} \quad (1-7)$$

式中， p 为流体压强，Pa； P 为总压力，N； A 为受力面积， m^2 。

压强的单位除用 Pa 表示外，还可用于大气压 (atm)、米水柱 (mH_2O)、毫米汞柱 (mmHg)、巴 (bar) 等表示，所以熟练掌握压强不同单位间的换算十分重要。

$1 \text{ atm (物理大气压)} = 760 \text{ mmHg} = 10.33 \text{ mH}_2\text{O} = 1.033 \text{ kgf/cm}^2$ (工程大气压，at) = $1.0133 \times 10^5 \text{ Pa} = 1.0133 \text{ bar}$

工程上为计算方便，还引入工程大气压换算系统。

$1 \text{ at (工程大气压)} = 735.6 \text{ mmHg} = 10 \text{ mH}_2\text{O} = 1 \text{ kgf/cm}^2 = 9.807 \times 10^4 \text{ Pa} = 0.9807 \text{ bar}$

此处需要指出： 1 kgf 指 1 kg 物体在 $g = 9.81 \text{ m/s}^2$ 重力场中受到的重力，称为“千克力”， 1 kgf/cm^2 作为压强单位有时在有些文献或工程现场中用到。

压强的大小常以两种不同的基准来表示：一是绝对真空即绝对零压；二是大气压强。以绝对真空即绝对零压为基准测得的压强称为绝对压强，简称绝压；以大气压强为基准测得的压强称为表压强或真空度。

通常当设备内流体的绝对压强高于外界大气压时，常在设备上安装压强表，压强表上的读数称为表压强，它反映流体的绝对压强高于外界大气压的数值，即可表示为：

$$\text{表压强} = \text{绝对压强} - \text{外界大气压 (当时当地)}$$

当设备内流体的绝对压强低于外界大气压时，工程上视为负压操作，常在设备上安装真空表，真空表上的读数称为真空度，它反映流体绝压低于外界大气压的数值，即可表示为：

$$\text{真空度} = \text{外界大气压 (当时当地)} - \text{绝对压强}$$

绝对压强、大气压、表压强和真空度之间的关系如图 1-1 所示。不难看出，真空度实际上是流体表压强的负值。例如，体系的真空度为 $3.3 \times 10^3 \text{ Pa}$ ，则其表压强为 $-3.3 \times 10^3 \text{ Pa}$ 。

为了避免不必要的错误，在工程计算中，必须在压强的单位后加括号或加注脚注明压强的不同表示方法。例如： $p = 2.0 \text{ kgf/cm}^2$ (表压)， $p_{\text{真空度}} = 300 \text{ mmHg}$ ， $p = 4.9 \times 10^5 \text{ Pa}$ (绝压) 等。

【例 1-1】 在兰州操作的苯乙烯真空精馏塔塔顶的真空表读数为 $80 \times 10^3 \text{ Pa}$ 。在天津操作时，若要求塔内维持相同的绝对压强，真空表的读数应为多少？兰州地区的平均大气压强为 $85.3 \times 10^3 \text{ Pa}$ ，天津地区的平均大气压强为 $101.33 \times 10^3 \text{ Pa}$ 。

解：根据兰州地区的大气压强条件，可求得操作时塔顶的绝对压强为：

$$\text{绝对压强} = \text{大气压强} - \text{真空度} = 85300 - 80000 = 5300 \text{ (Pa)}$$

在天津操作时，要求塔内维持相同的绝对压强，由于天津当地的大气压强与兰州的不同，则塔顶的真空度也不相同，其值为：

$$\text{真空度} = \text{大气压强} - \text{绝对压强} = 101330 - 5300 = 96030 \text{ (Pa)}$$

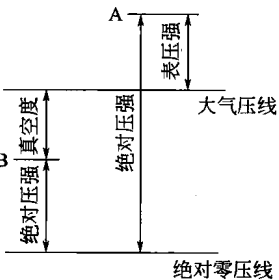


图 1-1 绝对压强、大气压、表压强和真空度的关系

1.2.3 流体静力学基本方程

1.2.3.1 方程推导

流体的静止状态是流体运动的一种特殊形式，它之所以能在设备内维持相对静止状态，

是它在重力与压力作用达到平衡的结果。所以，静止流体的规律就是流体在重力场的作用下流体内部压力变化的规律。该变化规律的数学描述，称为流体静力学基本方程，简称静力学方程。

静力学方程导出的思路是，在静止的流体中取微元体作受力分析，建立微分方程，然后在一定的边界条件下积分。

如图 1-2 所示，在面积为 A 的液柱（方形、矩形、圆形均可）上取微元高度 dz ，对微元体 Adz 作受力分析：

下底面总压力 pA
 上底面总压力 $-(p+dp)A$
 本身重力 $\rho A dz g$
 流体静止时，上述三力之和等于零，即

$$dp + \rho g dz = 0 \quad (1-8)$$

一般来说，在过程工程领域中须把流体密度作为变量的情况很少，流体密度往往可按常数处理，即使在气体输送中，在输送管的起端与终端气体密度存在差异，但因气体密度的相对变化量通常很小，还是允许取两端气体密度的均值来按常量处理。所以，在下面的讨论中，流体均按恒密度流体计算，即 $\rho = \text{常数}$ ，则上式不定积分求得：

$$\frac{p}{\rho} + gz = \text{常数} \quad (1-9)$$

若取边界条件为： $z = z_1$ ， $p = p_1$ ； $z = z_2$ ， $p = p_2$ ，则将式(1-9)定积分得：

$$\frac{p_1}{\rho} + gz_1 = \frac{p_2}{\rho} + gz_2 \quad (1-10)$$

对式(1-10)整理变形还可以得到如下几式：

$$\frac{p_2 - p_1}{\rho} = g(z_1 - z_2) = gh \quad (1-10a)$$

$$p_2 = p_1 + \rho gh \quad (1-10b)$$

$$\frac{p_2 - p_1}{\rho g} = z_1 - z_2 = h \quad (\text{m 流体柱高}) \quad (1-10c)$$

式(1-10)和式(1-10a)~式(1-10c)均称为流体静力学基本方程式，说明了在重力场中，静止流体内部压强的变化规律。

1.2.3.2 对流体静力学方程的讨论

① 静力学基本方程成立的前提条件：在重力场中，流体是静止的、连续的同一种流体，且流体的密度恒定。否则，式(1-10)和式(1-10a)~式(1-10c)表示的静力学基本方程式不成立。

② 由式(1-10b)可知，液体中任一点的压强大小与液面上方压强 p_1 及液体密度 ρ 和该点所处深度 h 有关，所在位置越低、密度越大，则其压力越大。而且，液面上方压力有任何数量的改变，液体内部任一点的压力也将有同样大小和方向的改变，即压力可以同样大小传至液体各点处。

③ 液体中任意水平面上各点的压强相同，称为等压面。等压面可用静止、连续、均一、水平八个字来体现，等压面的正确选取是流体静力学基本方程应用的关键所在。

④ 因各类常见工业容器中气体密度变化不大，所以上述静力学基本方程式也适用于气体。