



普通高等教育“十一五”国家级规划教材



面向21世纪课程教材

化工流体流动与传热

第二版

柴诚敬 张国亮 主编



化学工业出版社

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

面向 21 世纪课程教材

化工流体流动与传热

第 二 版

柴诚敬 张国亮 主编



化学工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

化工流体流动与传热/柴诚敬, 张国亮主编. —2 版.
北京: 化学工业出版社, 2007.7
普通高等教育“十一五”国家级规划教材. 面向 21 世纪
课程教材
ISBN 978-7-122-00803-9

I. 化… II. ①柴…②张… III. ①化工过程-流体流动-
高等学校-教材②化工过程-传热-高等学校-教材
IV. TQ021.1 TQ021.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 104344 号

责任编辑: 何 丽
责任校对: 周梦华

文字编辑: 赵媛媛
装帧设计: 史利平

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: 北京中科印刷有限公司
装 订: 三河市延风装订厂
787mm×1092mm 1/16 印张 23 $\frac{1}{2}$ 字数 616 千字 2007 年 8 月北京第 2 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

第二版前言

《化工流体流动与传热》作为面向 21 世纪高等教育改革新体系教材，于 2000 年出版以来，得到界内同行的热情支持、鼓励和肯定，总体反映良好。本书的第二版被列为普通高等教育“十一五”国家级规划教材。本次修订在保持原书总框架体系的前提下，对部分内容进行了更新和调整，主要考虑以下两方面因素：

(1) 紧密跟踪化工领域最新的科技成果，对部分内容进行充实和更新，以体现教材的先进性；

(2) 根据近年来教学实践的体验，对某些内容进行了删改和调整，进一步提高教材的可读性和科学性，以便于教和学。

第二版教材主要修订内容如下：

(1) 各章在内容顺序上都有局部调整，其中第 1 章“流体流动基础”的变动幅度较大，对连续性方程、运动方程从普遍性到特定形式的总体思路进行重新整合，并更充分体现工程方法论，有利于启迪学生思维创新；

(2) 基于课程总学时的考虑，对部分内容进行了删减；

(3) 附录中更新了部分内容；

(4) 去掉第一版教材中有章节段的“★”号，各不同专业可根据需要取舍相关内容。

教材修订工作由各章的原执笔者分别负责完成，即柴诚敬（绪论、流体输送机械及附录）；张国亮（流体流动基础及蒸发）；夏清（颗粒与流体之间的相对运动）；马红钦（液体搅拌）；张凤宝（传热过程基础）；贾绍义（换热器）。全书由柴诚敬、张国亮审阅定稿。在本书的修订过程中，得到天津大学化工学院有关教师的大力支持和帮助，在此表示衷心的感谢！

应予指出，一套新体系教材的成熟与完善，需要进行多次的调整与修订。为此，欢迎界内同行对本版教材提出宝贵意见。

编者

2007 年 6 月于天津大学

第一版序

《化工类专业人才培养方案及课程内容体系改革的研究与实践》项目为原国家教委(现教育部)《面向 21 世纪高等工程教育教学内容和课程体系改革计划》的首批项目,于 1996 年 6 月立项进行。本项目牵头单位为天津大学,主持单位为华东理工大学、浙江大学、北京化工大学,参加单位为大连理工大学、四川大学、华南理工大学。

项目组以邓小平同志提出的“教育要面向现代化,面向世界,面向未来”为指针,认真学习我国关于教育工作的各项方针、政策,在广泛调查研究的基础上,分析了国内外化工高等教育的现状、存在问题和未来发展。四年多来项目组共召开了由 7 校化工学院、系领导亲自参加的 10 次全体会议进行交流,形成了一个化工专业教育改革的总体方案,其中包括:

- 制定《面向 21 世纪“化学工程与工艺”专业人才培养方案》;
- 组织编写面向 21 世纪化工专业课与选修课系列教材;
- 建设化工专业实验、设计、实习样板基地;
- 开发与使用现代化教学手段等。

《面向 21 世纪“化学工程与工艺”专业人才培养方案》从转变传统教育思想出发,拓宽专业范围,包括了过去的各类化工专业,以培养学生的素质、知识与能力为目标,重组课程体系,在加强基础理论与实践环节的同时,增加人文社科课和选修课的比例,适当削减专业课份量,并强调采取启发性教学与使用现代化教学手段,因而可以较大幅度地减少授课时数,以增加学生自学与自由探讨的时间,这就有利于逐步树立学生勇于思考与走向创新的精神。项目组所在各校对培养方案进行了初步试行与教学试点,结果表明是可行的,并收到了良好效果。

化工专业教育改革总体方案的另一主要内容是组织编写面向 21 世纪教材。高质量的教材是培养高素质人才的重要基础。项目组要求教材作者以教改精神为指导,力求新教材从认识规律出发,阐述本门课程的基本理论与应用及其现代进展,并采用现代化教学手段,做到新体系、厚基础、重实践、易自学、引思考。每门教材采取自由申请及择优选定的原则。项目组拟定了比较严格的项目申请书,包括对本门课程目前国内外教材的评述、拟编写教材的特点、配合的现代教学手段(例如提供教师在课堂上使用的多媒体教学软件,附于教材的辅助学生自学用的光盘等)、教材编写大纲以及交稿日期。申请书在项目组各校评审,经项目组会议择优选取立项,并适时对样章在各校同行中进行评议。全书编写完成后,经专家审定是否符合面向 21 世纪教材的要求。项目组、教学指导委员会、出版社签署意见后,报教育部审核批准方可正式出版。

项目组按此程序组织编写了一套“化学工程与工艺”专业面向 21 世纪教材，共计 25 种，将陆续推荐出版，其中包括专业教材、选修教材、实验教材、设计教材以及计算机仿真实验与仿真实习教材等。本教材就是其中的一种。

本套教材是面向 21 世纪、为“化学工程与工艺”专业的专业课和选修课教材，但由于受到我们目前对教学改革的认识与水平所限，仍然会有不妥之处，尚请广大读者予以指正。

化工专业的教学改革是一项长期的任务，本项目的全部工作仅仅是一个开端。作为项目组的总负责人，我衷心地对多年来给予本项目大力支持的各校和为本项目贡献力量的人们表示最诚挚的敬意！

中国科学院院士、化学工程教授

余国琮

2000 年 4 月于天津

第一版前言

为了适应培养跨世纪高级化工专门人才的需要，我们以“面向 21 世纪的教学内容和课程体系改革”为主导思想，以“面向 21 世纪对化工类专门人才的知识、能力、综合素质培养目标”为宗旨，以“加强基础，拓宽知识面，提高学生创造能力”为原则，将传统的《化工原理》和《化工传递过程》有机地融为一体，并适当吸取《化工分离工程》的有关内容，依据传递过程的理论体系和单元操作的共性，按《化工流体流动与传热》和《化工传质与分离过程》两门课程开设。

新教材体系不仅拓宽了内容，而且注意吸取化工学科领域的新理论、新技术、新设备等最新成果，介绍学科前沿的发展动态，以期达到教材的科学性、先进性和适用性的统一。

本教材以动量传递和热量传递的基本理论体系为主线，论述了流体输送、颗粒与流体之间的相对运动（包括了颗粒的沉降分离、过滤分离、固体流态化技术）、液体搅拌、换热过程及设备、蒸发等操作。结合实例讨论了理论解析法的使用条件与场合，阐明了对复杂情况借助实验研究的必要性，以利于学生对化工单元操作基本内容的理解与掌握，增强工程观点，并在此基础上创造性地去分析与解决工程实际问题。

本教材注意吸取原我校编写的《化工原理》和《化工传递过程基础》等教材的优点，按照学科发展和认识规律，由浅入深，循序渐进，难点分散，实例丰富，力求概念清晰、层次分明，启迪思维，便于自学。

为了增加教材使用的灵活性，本书中凡划★的节段，各校可根据情况选讲。

本书可作为化工类及相关专业（包括化工、石油、生物工程、制药、材料、冶金、环保、核能等）的教材，也可供有关部门的科研、设计及生产单位的科技人员参考。

本书主编柴诚敬、张国亮。参加编写工作的有柴诚敬（绪论、流体输送机械及附录）、张国亮（流体流动基础及蒸发）、夏清（颗粒与流体之间的相对运动）、马红钦（液体搅拌）、张凤宝（传热过程基础）、贾绍义（换热器）。在编写过程中，天津大学化工学院的有关老师给予热情的关心、支持和帮助，在此表示感谢。

本教材承蒙蒋维钧、杨祖荣、姚玉英三位教授主审，他们提出许多经推敲的真知灼见，对此致以诚挚的谢意。

由于水平所限，书中不完善甚至缺点错误在所难免，敬请同仁和读者提出指正，以使本教材日臻完善。

编者

2000 年 3 月

目 录

0 绪论	1
0.1 化学工程学科的进展	1
0.1.1 化学工艺与单元操作	1
0.1.2 化学工程及其进展	1
0.2 单元操作及传递过程	2
0.2.1 单元操作分类	2
0.2.2 传递过程	2
0.2.3 单元操作与传递过程的融合	2
0.2.4 本课程的研究方法	3
0.2.5 本课程的学习要求	3
0.3 单位制度和单位换算	3
0.3.1 单位和单位制度	4
0.3.2 单位换算	4
习题	6
思考题	7
第 1 章 流体流动基础	8
1.1 流体的物理性质	8
1.1.1 连续介质假定	8
1.1.2 流体的密度和比容	8
1.1.3 流体的膨胀性和压缩性	9
1.1.4 流体的黏性	10
1.2 流体静力学	11
1.2.1 作用在流体上的力	12
1.2.2 流体的静压力及其特性	12
1.2.3 流体静力学基本方程	13
1.2.4 流体静力学方程的应用	16
1.3 流体流动概述	18
1.3.1 描述流体运动的方法	18
1.3.2 稳态与非稳态流动	19
1.3.3 流量与平均流速	19
1.3.4 流体流动的类型	22
1.4 流体流动的基本方程	23
1.4.1 连续性方程	23
1.4.2 运动方程	26
1.4.3 机械能衡算方程	30
1.4.4 管流机械能衡算方程的应用	35
1.5 流体流动的阻力	38
1.5.1 流动阻力与能量损失的概念	38
1.5.2 圆管内的稳态层流	41
1.5.3 非圆形管路中的层流	43
1.5.4 圆管湍流的速度分布	46
1.5.5 管内湍流的摩擦阻力与量纲 分析	49
1.5.6 边界层的概念与局部阻力	53
1.6 管路计算	59
1.6.1 简单管路	60
1.6.2 并联与分支管路	61
1.6.3 可压缩流体管路的计算	64
1.7 流量测量	66
1.7.1 测速管	66
1.7.2 孔板流量计	67
1.7.3 文丘里流量计	70
1.7.4 转子流量计	70
1.8 非牛顿流体的流动	72
1.8.1 非牛顿型流体的流动特性	72
1.8.2 幂律流体在管内流动的阻力	73
本章符号说明	75
习题	75
思考题	81
参考文献	82
第 2 章 流体输送机械	83
2.1 概述	83
2.1.1 管路系统对流体输送机械的基本 要求	83
2.1.2 流体输送机械的分类	85
2.2 离心泵	85
2.2.1 离心泵的基本结构和工作原理	85
2.2.2 离心泵的基本方程和特性方程	88
2.2.3 离心泵的性能参数与特性曲线	91
2.2.4 离心泵的工作点和流量调节	97
2.2.5 离心泵的气蚀现象与安装 高度	102
2.2.6 离心泵的类型与选择	105

2.3 其他类型液体输送机械	108	压缩机	115
2.3.1 往复泵	108	2.4.2 往复式压缩机	118
2.3.2 回转泵	112	2.4.3 回转鼓风机、压缩机	122
2.3.3 旋涡泵	113	2.4.4 真空泵	123
2.3.4 常用液体输送机械的性能 比较	114	本章符号说明	125
2.4 气体输送机械	114	习题	126
2.4.1 离心式通风机、鼓风机和压 缩机	114	思考题	127
		参考文献	128
第3章 流体与颗粒之间的相对运动	129		
3.1 流体与颗粒的相对运动	129	过滤	158
3.1.1 颗粒的特性	129	3.4.5 过滤常数的测定	160
3.1.2 球形颗粒自由沉降过程分析	130	3.4.6 过滤设备	161
3.1.3 阻力系数(曳力系数) ζ	131	3.4.7 滤饼的洗涤	164
3.1.4 影响沉降速度的因素	132	3.4.8 过滤机的生产能力	165
3.2 沉降分离	133	3.5 离心机	168
3.2.1 重力沉降	133	3.5.1 一般概念	168
3.2.2 离心沉降	140	3.5.2 离心机的结构与操作	169
3.3 流体通过固体颗粒床层的运动	149	3.6 固体流态化	171
3.3.1 固体颗粒群的特性	149	3.6.1 流态化的基本概念	171
3.3.2 固体颗粒床层的特性	150	3.6.2 流化床的流体力学特性	173
3.3.3 流体通过固体颗粒床层(固定 床)的压降	151	3.6.3 流化床的总高度	177
3.4 过滤	152	3.6.4 提高流化质量的措施	178
3.4.1 过滤操作的原理	152	3.6.5 气力输送简介	179
3.4.2 过滤基本方程式	154	本章符号说明	182
3.4.3 恒压过滤	157	习题	183
3.4.4 恒速过滤与先恒速后恒压的 过滤	157	思考题	185
		参考文献	185
第4章 液体搅拌	187		
4.1 概述	187	4.3 搅拌功率	197
4.1.1 典型的机械搅拌设备	187	4.3.1 搅拌功率准数关联式	197
4.1.2 搅拌的目的和搅拌在工业中的 应用	188	4.3.2 搅拌功率的计算	199
4.2 机械搅拌器及混合机理	188	4.4 搅拌器的放大	205
4.2.1 机械搅拌器的类型	188	4.4.1 放大基准	205
4.2.2 搅拌作用下流体的流动	192	4.4.2 按功率准数的放大	206
4.2.3 搅拌器附件	194	4.4.3 按工艺过程结果的放大	206
4.2.4 搅拌槽内液体循环量和压头	195	本章符号说明	208
4.2.5 混合机理	196	习题	208
4.2.6 搅拌器的选择	196	思考题	209
		参考文献	209
第5章 传热过程基础	210		
5.1 传热导论	210	5.1.2 对流传热	212
5.1.1 热传导及热导率	210	5.1.3 辐射传热	213

5.1.4 典型传热设备	213	系数	230
5.2 能量方程	214	5.4.6 动量传递与热量传递的类比	234
5.2.1 能量方程的推导	214	5.4.7 自然对流传热	238
5.2.2 能量方程的特定形式	215	5.4.8 流体有相变时的对流传热 系数	241
5.2.3 柱坐标系与球坐标系的能量 方程	216	5.5 辐射传热	249
5.3 热传导	217	5.5.1 基本概念和定律	249
5.3.1 无内热源的一维稳态热传导	217	5.5.2 两固体间的辐射传热	252
5.3.2 有内热源的一维稳态热传导	221	5.5.3 气体的辐射传热	254
5.4 对流传热	222	5.5.4 对流和辐射联合传热	256
5.4.1 对流传热机理	222	主要符号说明	257
5.4.2 热边界层及对流传热系数	223	习题	258
5.4.3 管内强制层流传热的理论 分析	224	思考题	260
5.4.4 对流传热过程的量纲分析	227	参考文献	260
5.4.5 流体无相变时的强制对流传热			
第6章 换热器	261		
6.1 换热器的分类与结构形式	261	6.4 管壳式换热器的设计和选型	287
6.1.1 换热器的分类	261	6.4.1 管壳式换热器的型号与系列 标准	287
6.1.2 换热器的结构形式	262	6.4.2 管壳式换热器的设计与选型	288
6.2 换热器的传热计算	270	本章符号说明	295
6.2.1 总传热速率方程	270	习题	296
6.2.2 传热计算方法	275	思考题	297
6.3 换热器传热过程的强化	285	参考文献	297
6.3.1 传热过程的强化途径	285		
6.3.2 传热过程强化效果的评价	287		
第7章 蒸发	298		
7.1 概述	298	7.4 多效蒸发	316
7.1.1 蒸发的概念与过程分类	298	7.4.1 多效蒸发流程	316
7.1.2 蒸发操作的特点	299	7.4.2 多效蒸发的计算	318
7.2 蒸发设备	299	7.4.3 多效蒸发的经济性及效数 限制	325
7.2.1 常用蒸发器的结构与特点	299	7.4.4 提高加热蒸汽经济性的其他 措施	326
7.2.2 蒸发器性能的比较与选型	304	本章符号说明	327
7.2.3 蒸发的辅助设备	305	习题	327
7.3 单效蒸发	305	思考题	328
7.3.1 物料与热量衡算方程	306	参考文献	328
7.3.2 传热速率方程	309		
7.3.3 蒸发强度与加热蒸汽的 经济性	315		
附录	329		
一、中华人民共和国法定计量单位	329	三、某些气体的重要物理性质	332
二、常用单位的换算	329	四、某些液体的重要物理性质	333

五、干空气的物理性质 (101.33kPa)	335	十七、液体的比热容	347
六、水的物理性质	335	十八、101.33kPa 压力下气体的 比热容	349
七、水的饱和蒸汽压 (-20~100℃)	336	十九、蒸发潜热(汽化热)	350
八、饱和水蒸气表(以温度为准)	337	二十、壁面污垢热阻(污垢系数)	352
九、饱和水蒸气表(以用 kPa 为单位的 压力为准)	338	二十一、无机盐水溶液的沸点	353
十、某些液体的热导率	340	二十二、管子规格(摘录)	354
十一、某些气体和蒸气的热导率	341	二十三、离心泵规格(摘录)	358
十二、某些固体材料的热导率	342	二十四、离心通风机规格(摘自 GB/T 13276—91)	362
十三、常用固体材料的密度和比热容	343	二十五、管壳式换热器系列标准 (摘录)	363
十四、水在不同温度下的黏度	343	二十六、管壳式换热器总传热系数 K 的 推荐值	366
十五、液体的黏度	344		
十六、101.33kPa 压力下气体的黏度	346		

0 绪 论

0.1 化学工程学科的进展

0.1.1 化学工艺与单元操作

化学工业泛指对原料进行化学加工，以改变物质结构或组成，或合成新物质，而获得有用产品的制造业，又称化学加工工业。由于产品、原料的多样性及生产过程的复杂性，形成了数以万计的化工生产工艺。纵观纷杂众多的化工生产过程，都是由化学反应和若干物理操作有机地组合而成。其中，化学反应过程及其设备——反应器是化工生产的核心，物理过程则起到为化学反应准备必要的反应条件及将反应产物提纯而获得最终产品的作用。构成多种化工产品生产的物理过程都可归纳为有限的几个基本过程，如流体输送、加热或冷却、沉降、蒸发、蒸馏、结晶、干燥等。这些基本物理操作统称为化工单元操作，简称单元操作。本课程只研究这些物理操作。从以产品来划分的化工生产工艺中抽象出单元操作，是认识上的一个飞跃。1923年，美国麻省理工学院的著名教授 W. H. 华克尔等人编写并出版了第一部关于单元操作的著作《化工原理》(Principles of Chemical Engineering)。在该书中，阐述了各种单元操作的物理化学原理及定量计算方法，并从物理学等基础学科中吸收了对化学工程有用的研究方法(如量纲分析)及研究成果(如雷诺关于层流、湍流的研究)，奠定了化学工程作为一门独立工程学科的基础。此书的出版，对以后化学工程师的培养和训练产生了深远的影响，对化学工程学科的形成和发展起到了推动作用，促进了化学工业的发展。

我国于20世纪20年代创办了化学工程系，也开出化工原理课程。解放以后，我国先后出版了以单元操作为主线的《化工原理》、《化工过程及设备》、《化工操作原理与设备》等教科书。至今，仍沿用《化工原理》名称。

0.1.2 化学工程及其进展

化学工程是研究化学工业和相关过程工业(Process industry)生产中所进行的化学反应过程及物理过程共同规律的一门工程学科。它的范围包括了采用化学加工技术的所有场合。不但覆盖了整个化学与石化工业，而且渗透到能源、环境、生物、材料、制药、冶金、轻工、卫生、信息等工业及技术部门。20世纪初期，对于化学工程的认识仅限于单元操作。20世纪60年代，“三传一反”(动量传递、热量传递、质量传递和化学反应工程)概念的提出，开辟了化学工程发展过程的第二个历程。

20世纪60年代末，计算机的迅速发展和普及，给化学工程学科的发展注入了新的活力。时至今日，化学工程学科形成了单元操作、传递过程、反应工程、化工热力学、化工系统工程、过程动态学及控制等完整体系。计算机模拟技术的高速发展，更把化学工程推向了过程优化集成、分子模拟的新阶段。

现代科学技术既高度分化又高度综合，但综合是主流。当今的高新技术及新兴学科都是综合的学科，如生命科学、环境科学、能源科学、材料科学等都是综合科学。化学工程与上述相邻学科相融合逐渐形成了若干新的分支与生长点，诸如：生物化学工程、分子化学工程、环境化学工程、能源化学工程、计算化学工程、软化学工程、微电子化学工程等。同时，上述新兴产业与学科的发展，也推动了特殊领域化学工程的进步。

0.2 单元操作及传递过程

0.2.1 单元操作分类

各种单元操作依据不同的物理化学原理,采用相应的设备,达到各自的工艺目的。对于单元操作,可从不同角度加以分类。根据各单元操作所遵循的基本规律,将其划分为如下类型。

① 遵循流体动力学基本规律的单元操作 包括流体输送、沉降、过滤、物料混合(搅拌)等。

② 遵循热量传递基本规律的单元操作 包括加热、冷却、冷凝、蒸发等。

③ 遵循质量传递基本规律的单元操作 包括蒸馏、吸收、萃取、吸附、膜分离等。从工程目的来看,这些操作都可将混合物进行分离,故又称之为分离操作。

④ 同时遵循热质传递规律的单元操作 包括气体的增湿与减湿、结晶、干燥等。

另外,还有热力过程(制冷)、粉体工程(粉碎、颗粒分级、流态化)等单元操作。

单元操作包括“过程”和“设备”两个方面的内容,故单元操作又称化工过程和设备。同一单元操作在不同的化工生产中,虽然遵循相同的过程规律,但在操作条件及设备类型(或结构)方面会有很大差别。另一方面,对于同样的工程目的,可采用不同的单元操作来实现。例如一种液态均相混合物,既可用蒸馏方法分离,也可用萃取方法,还可用结晶或膜分离方法,究竟哪种单元操作最适宜,需要根据工艺特点、物系特性通过综合技术经济分析作出选择。

随着新产品、新工艺的开发或为实现绿色化工生产,对物理过程提出了一些特殊要求,又不断地发展出新的单元操作或化工技术,如膜分离、参数泵分离、电磁分离、超临界技术等。同时,以节约能耗,提高效率或洁净生产的集成化工艺(如反应精馏、反应膜分离、萃取精馏、多塔精馏系统的优化热集成等)将是未来的发展趋势。

0.2.2 传递过程

随着对单元操作研究的不断深入,人们逐渐发现若干个单元操作之间存在着共性。从本质上讲,所有的单元操作都可分解为动量传递、热量传递、质量传递这三种传递过程或它们的结合。前述的三大类单元操作可分别用动量、热量、质量传递的理论进行研究。于是在1960年前后,《传递现象》(Transport Phenomena)与《动量、热量、质量传递》(Momentum, Heat and Mass Transfer)等著作相继出版。三种传递现象中存在着类似的规律和内在联系,可用相类似的数学模型进行描述,并可归结为速率问题进行综合研究。“三传理论”的建立,是单元操作在理论上的进一步发展和深化。

0.2.3 单元操作与传递过程的融合

由上面讨论可看到,单元操作与传递之间有着紧密的内在联系,主要表现为以下几点。

① 传递是单元操作的科学基础 所有的单元操作皆可归属于相应的传递过程,传递过程是联系各单元操作的一条主线。以传递原理的共性将单元操作进行归类并给予更深入、科学的解释,以便更好地揭示“过程机理”,使经验上升为理论,从而有利于优化各类传递过程和设备的设计、操作和控制。

需要指出的是,化工热力学是应用热力学基本定律研究化工过程中各种形式能量之间相互转化的规律及有效利用、过程(含热力过程、相平衡及化学平衡)趋近于平衡的极限条件,并提供上述内容的基础数据。所以,化工热力学同样是单元操作的科学基础。

② 传递是单元操作数学模型的基础 传递为所研究的过程提供基础数学模型,借计算机的帮助,就可进行过程数学模拟的研究。和传统的实验研究方法相比,这是一种快捷、高

效、经济的工程研究方法。

将传递与单元操作有机结合，以提高传统《化工原理》的科学性、综合性，反映了学科的发展。同时，为了使该课程更接近于生产实际，适当吸取《化工分离工程》内容，以加深和拓宽现行《化工原理》中的传质单元操作，组成“三合一”新体系教材，并按其体系分为《化工流体流动和传热》、《化工传质与分离过程》两门课程开设，它们是培养化工专门人才的主干课程。

0.2.4 本课程的研究方法

本课程是一门实践性很强的工程学科，在其长期的发展进程中，形成了两种基本研究方法，即：

① 实验研究方法（经验法） 该方法一般用量纲分析和相似论为指导，依靠实验来确定过程变量之间的关系，通常用量纲为一数群构成的关系来表达。实验研究方法可避免建立数学方程，是一种工程上通用的基本方法。

② 数学模型法（半经验半理论方法） 该方法是在对实际过程的机理进行深入分析的基础上，抓住过程的本质，作出某些合理简化，建立物理模型，进行数学描述，得出数学模型。通过实验确定模型参数。这是一种半经验半理论的方法。

如果一个物理过程的影响因素较少，各参数之间的关系比较简单，能够建立数学方程并能直接求解，则称之为解析方法。

值得指出的是，尽管计算机数学模拟技术在化工领域中的应用发展很快，但实验研究方法仍不失其重要性，因为即使是可以采用数学模型方法，但模型参数还需通过实验来确定。

研究工程问题的方法论是联系各单元操作的另一条主线。

化工过程计算可分为设计型计算和操作型计算两类，其不同计算中的处理方法各有特点。但是不管何种计算，都是以质量守恒、能量守恒、平衡关系和速率关系为基础的。上述四种基本关系将在有关章节陆续介绍。

0.2.5 本课程的学习要求

该课程是化工类及相近专业一门重要的技术基础课，它是综合运用数学、物理、化学等基础知识，分析和解决化工类型生产中各种物理过程问题的工程学科。在化工类专门人才培养中，它承担着工程科学与工程技术的双重教育任务。本课程强调工程观点、定量运算、实验技能及设计能力的培养，强调理论联系实际。学生在学习本课程中，应注意以下几个方面能力的培养。

① 单元操作和设备选择的能力 根据生产工艺要求和物系特性，合理地选择单元操作及设备。

② 工程设计能力 学习进行工艺过程计算和设备设计。当缺乏现成数据时，要能够从资料中查取，或从生产现场查定，或通过实验测取。学习利用计算机辅助设计。

③ 操作和调节生产过程的能力 学习如何操作和调节生产过程。在操作发生故障时，能够查找故障原因，提出排除故障的措施。了解优化生产过程的途径。

④ 过程开发或科学研究能力 学习如何根据物理或物理化学原理选择或设置单元操作，进而组织一个生产工艺过程，实现工程目的，培养学生综合创造能力。

0.3 单位制度和单位换算

任何物理量的大小都是由数字和单位联合来表达的。过去，由于历史、地区的原因及学科的不同要求，出现多种单位制度。本节简要介绍单位制度的分类及不同单位制度之间的换

算关系。

0.3.1 单位和单位制度

在工程和科学中，单位制有不同的分类方法。

① 基本单位和导出单位 一般选择几个独立的物理量（如质量、长度、时间、温度等），根据使用方便的原则规定出它们的单位，这些选择的物理量称为基本物理量，其单位称为基本单位。其他的物理量（如速度、加速度、密度等）单位则根据其本身的物理意义，由有关基本单位组合而成。这种组合单位称为导出单位。

② 绝对单位制和重力单位（工程单位）制 根据对基本物理量及其单位选择的不同，分为绝对单位制与重力单位制。绝对单位制度以长度、质量、时间为基本物理量，重力单位制度以长度、时间和力为基本物理量。显然，在绝对单位制度中，力是导出物理量，其单位为导出单位；而在重力单位制度中，质量是导出物理量，其单位为导出单位。力和质量的关系用牛顿第二运动定律相关联，即

$$F = ma \quad (0-1)$$

式中， F 为作用于物体上的力； m 为物体的质量； a 为物体在作用力方向上的加速度。

上述两种单位制度中又有米制单位与英制单位之分。两种单位制度中米制与英制的基本单位列于表 0-1。

表 0-1 两种单位制中的米制与英制基本单位

单位制度 \ 基本物理量	长度(L)	时间(T)	质量(M)	力或重力(F)	
绝对单位制度	cgS 制	cm	s	g	--
	mks 制	m	s	kg	--
	英制	ft	s	lb	--
重力单位制度 (工程单位制)	米制	m	s	--	kgf
	英制	ft	s	--	lb(f)

③ 国际单位制 (SI 制) 1960 年 10 月第十一届国际计量大会通过了一种新的单位制，称为国际单位制，其代号为 SI，它是 mks 制的引申。SI 制是一种完整的单位制，它包括了所有领域中的计量单位。这样，科学技术、工农业生产、经济贸易甚至日常生活中只使用一种单位制度。也就是 SI 制具有通用性的优点。在 SI 制中，同一种物理量只有一个单位，如能量、热、功的单位都采用焦耳 (J)，从而避免了重力单位制中热功之间换算因子的引入。这个优点称作“一贯性”。

正是由于 SI 制的“通用性”和“一贯性”优点，在国际上迅速得到推广。

④ 《中华人民共和国法定计量单位》(简称法定单位制) 以 SI 制为基础，我国于 1984 年颁布《中华人民共和国法定计量单位》及中华人民共和国国家标准 GB 3100~3102—93《量和单位》。我国的法定计量单位除 SI 制的基本单位、辅助单位和导出单位外，又规定了一些我国选定的非国际单位制单位。例如，时间在我国还可以用分 (min)、[小]时 (h)、日 (天) (d)；质量可用吨 (t)；长度可用海里 (n mile) 等。中华人民共和国法定计量单位制见附录一。

本套教材中采用法定计量单位。在少数例题与习题中有意识地编入一些非法定计量单位，目的是让读者练习单位之间的换算。

0.3.2 单位换算

当前，各学科领域都有采用国际单位制的趋势，但要在全球全面推广尚需一段时间，况且，过去文献资料中的数据又是多种单位制并存，这就需要掌握不同单位制之间的换算

方法。

① 物理量的单位换算。同一物理量，若采用不同的单位则其数值就不相同。例如最简单的一个基本物理量，圆形反应器的直径为 1m，在物理单位制度中，单位为 cm，其值为 100；而在英制中，其单位为 ft，其值为 3.2808。它们之间的换算关系为

$$\text{反应器直径 } D = 1\text{m} = 100\text{cm} = 3.2808\text{ft}$$

同理，重力加速度 g 不同单位制之间的换算关系为：

$$\text{重力加速度 } g = 9.81\text{m/s}^2 = 981\text{cm/s}^2 = 32.18\text{ft/s}^2$$

彼此相等而单位不同的两个同名物理量（包括单位在内）的比值称为换算因子，又称换算因数，如 1m 和 100cm 的换算因子为 100cm/m。常用物理量的单位换算关系可查附录二。

若查不到一个导出物理量的单位换算关系，则从该导出单位的基本单位换算入手，采用单位之间的换算因数与基本单位相乘或相除的方法，以消去原单位而引入新单位。具体换算过程见例 0-1。

【例 0-1】 质量速度的英制单位为 $\text{lb}/(\text{ft}^2 \cdot \text{h})$ ，试将其换算为 SI 制，即 $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。

解 在本教材附录二中查不到质量速度不同单位制之间的换算关系，则只能从基本单位换算入手。

从附录二查出基本物理量的换算关系为

$$1\text{kg} = 2.20462\text{lb}$$

$$1\text{m} = 3.2808\text{ft}$$

$$1\text{h} = 3600\text{s}$$

采用“原单位消去法”便得到新的单位。

$$\begin{aligned} \text{质量速度 } G &= 1 \left(\frac{\text{lb}}{\text{ft}^2 \cdot \text{h}} \right) = 1 \left(\frac{\text{lb}}{\text{ft}^2 \cdot \text{h}} \right) \left(\frac{1\text{kg}}{2.2046\text{lb}} \right) \left(\frac{3.2808\text{ft}}{1\text{m}} \right)^2 \left(\frac{1\text{h}}{3600\text{s}} \right) \\ &= 1.356 \times 10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}} \end{aligned}$$

② 经验公式（或数字公式）的单位换算。化工计算中常遇到的公式有两类。

一类为物理方程，它是根据物理规律建立起来的，如前述的式(0-1)。物理方程遵循单位或量纲一致的原则，即物理方程中各物理量可以选用任一种单位制，各项具有相同的单位或量纲。同一物理方程中绝不允许采用两种单位制度。

用一定单位制度的基本物理量来表示某一物理量，称为该物理量的量纲。同一物理量在不同的单位制中可能具有不同的量纲。在 mks 单位制度中，基本物理量质量、长度、时间、热力学温度的量纲分别用 M、L、T 与 θ 表示，力的量纲为 MLT^{-2} ；在重力单位制度中，力为基本量，其量纲用 F 表示，质量的量纲则变为 FT^2L^{-1} 。量纲一致的原则是量纲分析方法的基础。

另一类方程为经验方程，它是根据实验数据而整理成的公式，式中各物理量的符号只代表指定单位制的数字部分，因而经验公式又称数字公式。当所给物理量的单位与经验公式中指定的单位制度不相同，则需进行单位换算。可采取两种方式进行单位换算：其一，将诸物理量的数据换算成经验公式中指定的单位后，再分别代入经验公式进行运算；其二，若经验公式需经常使用，对大量的数据进行单位换算很繁琐，则可将公式加以变换，使式中各符号都采用所希望的单位制度。换算方法见例 0-2。

【例 0-2】 乱堆 25mm 拉西环的填料塔用于精馏操作时，等板高度可用下面经验公式计算，即

$$H_E = 3.9A (2.78 \times 10^{-4}G)^B (12.01D)^C (0.3048 Z_0)^{1/3} \left(\frac{\alpha\mu}{\rho}\right)$$

式中, H_E 为等板高度, ft; G 为气相质量速度, $\text{lb}/(\text{ft}^2 \cdot \text{h})$; D 为塔径, ft; Z_0 为每段 (即两层液体分布板之间) 填料层高度, ft; α 为相对挥发度, 量纲为一; μ 为液相黏度, cP; ρ 为液相密度, lb/ft^3 。

A、B、C 为常数, 对 25mm 的拉西环, 其数值分别为 0.57、-0.1 及 1.24。

试将上面经验公式中各物理量均换算为 SI 制。

解 上面经验公式是混合单位制度, 液相黏度 μ_L 为物理单位制, 而其余诸物理量均为英制。经验公式单位换算的基本要点是: 找出式中每个物理量新旧单位之间的换算关系, 导出物理量“数字”的表达式, 然后代入经验公式并整理, 使式中各符号都变为所希望的单位。具体换算过程如下:

(1) 从附录二查出或计算出经验公式中有关物理量新旧单位之间的关系如下。

$$1\text{ft} = 0.3049\text{m}$$

$$\text{lb}/(\text{ft}^2 \cdot \text{h}) = 1.356 \times 10^{-3} \text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}) \quad (\text{见例 0-1})$$

α 量纲为一不必换算

$$1\text{cP} = 1 \times 10^{-3} \text{Pa} \cdot \text{s}$$

$$1 \frac{\text{lb}}{\text{ft}^3} = 1 \left(\frac{\text{lb}}{\text{ft}^3}\right) \left(\frac{1\text{kg}}{2.2046\text{lb}}\right) \left(\frac{3.2808\text{ft}}{1\text{m}}\right)^3 = 16.02 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

(2) 将原符号加上标 “'” 以代表新单位的符号, 导出原符号“数字”表达式。下面以 H_E 为例

$$H_E \text{ ft} = H'_E \text{ m}$$

$$\text{则} \quad H_E = H'_E \frac{\text{m}}{\text{ft}} = H'_E \frac{\text{m}}{\text{ft}} \times \frac{3.2808 \text{ ft}}{1 \text{ m}} = 3.2808 H'_E$$

同理

$$G = G'/1.356 \times 10^{-3} = 737.5 G'$$

$$D = 3.2808 D'$$

$$Z_0 = 3.2808 Z'_0$$

$$\mu_L = \mu'_L / 1 \times 10^{-3} = 1000 \mu'_L$$

$$\rho_L = \rho'_L / 16.02 = 0.06242 \rho'_L$$

(3) 将以上关系式代入原经验公式, 得

$$3.2808 H'_E = 3.9 \times 0.57 (2.78 \times 10^{-4} \times 737.5 G')^{-0.1} (12.01 \times 3.2808 D')^{1.24}$$

$$(0.3048 \times 3.2808 Z'_0)^{1/3} \left(\alpha \frac{1000 \mu'_L}{0.06242 \rho'_L}\right)$$

整理上式并略去符号的上标, 便得到换算后的经验公式, 即

$$H_E = 1.086 \times 10^4 (0.205G)^{-0.1} (39.4D)^{1.24} Z_0^{1/3} \left(\frac{\alpha\mu_L}{\rho_L}\right)$$

应予指出, 经验公式中物理量的指数是表明该物理量对过程的影响程度, 与单位制无关, 因而经过单位换算后, 经验公式中各物理量的指数均不发生变化。

习 题

1. 从基本单位换算入手, 将下列物理量的单位换算为 SI 制。

(1) 40°C 时水的黏度 $\mu = 0.00656 \text{ g}/(\text{cm} \cdot \text{s})$ 。

(2) 某物质的比热容 $c_p = 0.21 \text{ BTU}/(\text{lb} \cdot \text{F})$ 。

(3) 密度 $\rho = 1386 \text{ kgf} \cdot \text{s}^2/\text{m}^4$ 。

(4) 传质系数 $K_G = 24.2 \text{ kmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{atm})$ 。