



普通高等教育“十三五”规划教材

普通高等院校化学化工类系列教材

任永胜 王淑杰 田永华 陈丽丽 编著

化工原理 (上册)

Principles of Chemical
Engineering (Unit 1)

清华大学出版社

普通高等院校化学化工类系列教材

任永胜 王淑杰 田永华 陈丽丽 编著

化工原理 (上册)

Principles of Chemical
Engineering (Unit 1)

清华大学出版社

北 京

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

化工原理.上/任永胜等编著. —北京:清华大学出版社,2018

(普通高等院校化学化工类系列教材)

ISBN 978-7-302-49600-7

I. ①化… II. ①任… III. ①化工原理—高等学校—教材 IV. ①TQ02

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 026142 号

责任编辑:冯 昕

封面设计:常雪影

责任校对:刘玉霞

责任印制:沈 露

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座

邮 编:100084

社 总 机:010-62770175

邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质量反馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 装 者:三河市君旺印务有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm 印 张:20.25

字 数:490 千字

版 次:2018 年 2 月第 1 版

印 次:2018 年 2 月第 1 次印刷

印 数:1~2000

定 价:49.80 元

产品编号:077409-01



前言

化工原理是化学工程与工艺、制药工程、应用化学、食品科学与工程、环境工程、生物工程及相近和相关专业的主干课程,其主要任务是研究化工过程单元操作的基本原理、典型过程设备,进行过程工艺设计计算和设备选型及单元过程的操作分析。通过本门课程的学习,并结合“化工原理实验”“化工原理课程设计”等课程的训练,培养学生的工程素养以及分析和解决化工生产实际问题的能力。

本教材以教育部高等学校化工类专业教学指导委员会对化工工程师培养的基本要求为指导,吸取国内外同类教材的长处,并结合编者在多年课程教学实践中形成的认识和经验编写而成。全书分上、下两册出版。上册除绪论与附录外,包括流体流动、流体输送机械、非均相物系的分离、传热及蒸发等单元操作;下册包括吸收、蒸馏、萃取、干燥、结晶及其他分离过程等单元操作。

本书由任永胜统稿。参加上册各章编写的有:绪论(于辉、任永胜);流体流动(王淑杰);流体输送机械(王淑杰);非均相物系的分离(王淑杰、陈丽丽);传热(田永华);蒸发(田永华);附录(陈丽丽、田永华、任永胜)。参与下册各章编写的有:吸收(王淑杰)、蒸馏(于辉)、传质设备(陈丽丽、田永华)、萃取(田永华、陈丽丽)、干燥(陈丽丽、田永华)、其他分离方法(于辉)。校稿工作由任永胜、王淑杰、陈丽丽、田永华、于辉等老师承担。在本书的编写过程中,化工系主任李平及范辉、张晓光、董梅、蔡超、方芬、詹海鹏、麻晓霞、王晓中、冯雪兰等同事给予了无私的帮助和支持,在此一并表示衷心的感谢。

本书的出版得到了宁夏高等学校一流学科建设项目(宁夏大学化学工程与技术学科,编号: NXYLXK2017A04)的资助,同时获得了省部共建煤炭高效利用与绿色化工国家重点实验室、化学国家基础实验教学示范中心(宁夏大学)、化学化工学院和清华大学出版社等单位的大力支持,在此致以诚挚的谢意。

由于编者水平所限,书中不妥之处甚至错误在所难免,恳请读者批评指正。

编 者

2017 年 12 月



目录

绪论	1
0.1 化学工业与化学工程	1
0.2 化工原理课程的内容和特点	2
0.3 化工原理课程的研究方法	3
0.4 化工原理课程的基本概念	3
0.5 化工原理课程的任务	5
0.6 单位制及单位换算	5
第1章 流体流动	7
1.1 流体流动的研究方法	7
1.1.1 流体的连续介质假定	7
1.1.2 流体质点运动的考察方法	7
1.1.3 作用在流体上的力	8
1.2 流体的基本性质	9
1.2.1 流体的流动性	9
1.2.2 流体的黏性	9
1.2.3 流体的密度及其他物理量	11
1.2.4 流体的可压缩性	12
1.3 流体静力学基本方程	13
1.3.1 作用在流体上的力	13
1.3.2 静止流体的压强及其特性	14
1.3.3 流体静力学基本方程	15
1.3.4 流体静力学方程的应用	18
1.4 流体流动的基本方程	22
1.4.1 稳态流动与非稳态流动	22
1.4.2 流量与流速	24
1.4.3 流体的衡算方程	25
1.5 圆管内流动阻力	33
1.5.1 动量传递与阻力产生的机理	33
1.5.2 流动阻力导论	37
1.5.3 流体流动边界层	40

1.5.4	流体流动阻力计算	43
1.5.5	局部阻力	50
1.5.6	系统的总阻力	54
1.6	管路计算	55
1.6.1	阻力对管内流动的影响	56
1.6.2	管路计算	57
1.7	流速和流量的测定	64
1.7.1	测速管	64
1.7.2	孔板流量计	66
1.7.3	文丘里流量计	68
1.7.4	转子流量计	69
	习题	72
第2章	流体输送机械	82
2.1	概述	82
2.1.1	管路系统对流体输送机械的基本要求	82
2.1.2	流体输送机械分类	84
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	87
2.2.3	离心泵的特性曲线与性能参数	92
2.2.4	离心泵的工作点和流量调节	95
2.2.5	离心泵的汽蚀现象与安装高度	98
2.2.6	离心泵的类型与选择	101
2.3	其他流体输送机械	107
2.3.1	往复泵	107
2.3.2	计量泵	110
2.3.3	隔膜泵	111
2.3.4	回转式泵	111
2.3.5	旋涡泵	113
2.4	气体输送机械	113
2.4.1	离心式通风机、鼓风机和压缩机	114
2.4.2	真空泵	117
	习题	120
第3章	非均相物系的分离	125
3.1	概述	125
3.2	颗粒及颗粒床层的特性	125
3.2.1	单一颗粒的特性	126

3.2.2 颗粒床层的特性	127
3.3 颗粒与流体间的相对运动	128
3.3.1 床层的当量直径	128
3.3.2 流体通过固体颗粒床层(固定床)的压降的数学描述	129
3.3.3 模型参数的实验测定	130
3.3.4 量纲分析法与数学模型法的比较	130
3.4 沉降分离	132
3.4.1 概述	132
3.4.2 重力沉降	132
3.4.3 离心沉降	140
3.5 过滤分离	145
3.5.1 过滤原理	145
3.5.2 过滤的数学描述——过滤基本方程式	148
3.5.3 过滤基本方程式	151
3.5.4 过滤操作方式	153
3.5.5 恒压过滤	153
3.5.6 过滤设备	156
3.5.7 滤饼的洗涤	159
3.5.8 过滤机的生产能力	161
3.5.9 强化过滤的途径	162
3.6 固体流态化	168
3.6.1 概述	168
3.6.2 流化床的流体力学	169
3.6.3 气力输送	174
习题	178
第4章 传热	180
4.1 概述	180
4.1.1 传热的基本方式	180
4.1.2 工业生产中的加热介质和冷却介质	181
4.1.3 典型传热设备	182
4.2 热传导	184
4.2.1 傅里叶定律	184
4.2.2 导热系数	185
4.2.3 平面壁的一维稳态热传导	187
4.2.4 圆筒壁的一维稳态热传导	189
4.3 对流传热	193
4.3.1 对流传热机理	194

4.3.2	对流传热速率方程	195
4.3.3	对流传热过程的量纲分析	196
4.4	对流传热系数关联式	200
4.4.1	流体无相变时的强制对流传热	201
4.4.2	流体有相变时的对流传热	203
4.5	辐射传热	211
4.5.1	辐射传热的基本概念	211
4.5.2	物体的辐射能力	212
4.5.3	对流和辐射联合传热	214
4.6	换热器的传热计算	215
4.6.1	热量衡算	215
4.6.2	总传热速率方程	216
4.6.3	传热平均温度差	219
4.7	换热设备	227
4.7.1	管式换热器	227
4.7.2	板式换热器	231
4.7.3	列管式换热器的设计和选型	235
4.7.4	传热过程的强化与削弱	244
	习题	247
第5章	蒸发	251
5.1	概述	251
5.2	单效蒸发	252
5.2.1	物料与热量衡算	252
5.2.2	传热速率方程	254
5.2.3	溶液的沸点和传热温度差损失	255
5.2.4	蒸发器的生产能力和蒸发强度	257
5.3	多效蒸发	260
5.3.1	多效蒸发流程	260
5.3.2	多效蒸发分析	262
5.3.3	多效蒸发计算	265
5.4	蒸发设备	271
5.4.1	常用蒸发器的结构与特点	271
5.4.2	蒸发器的工艺设计	276
5.4.3	蒸发器改进与发展	278
	习题	279
	参考文献	280

附录	281
附录 1 常用物理量的单位与量纲	281
附录 2 某些气体的重要物理性质	282
附录 3 某些液体的重要物理性质	283
附录 4 干空气的物理性质(101.3kPa)	285
附录 5 水的物理性质	286
附录 6 水的饱和蒸汽压	287
附录 7 饱和水蒸汽压表(按压强排列)	289
附录 8 某些液体的导热系数	291
附录 9 某些气体和蒸汽的导热系数	293
附录 10 某些固体材料的导热系数	295
附录 11 常用固体材料的密度和比热容	297
附录 12 壁面污垢热阻(污垢系数)	298
附录 13 无机盐水溶液的沸点(101.3kPa)	299
附录 14 离心泵的规格(摘录)	300
附录 15 4—72 型离心通风机规格(摘录)	305
附录 16 低压流体输送用(镀锌)焊接钢管(摘自 GB/T 3091—2008)	306
附录 17 管壳式换热器系列标准(摘录)	307
附录 18 管壳式换热器总传热系数 K 的推荐值	312

结 论

0.1 化学工业与化学工程

化学工业是对自然界中的各种物质资源通过化学和物理方法加工成具有规定质量的化工产品的工业。化工产品国民经济中占有重要地位,它不仅是工业、农业和国防部门的重要生产资料,也是人们日常生活中的重要生产资料。

在化学工业中,从原料到产品的生产过程称为化工工艺,由于化工产品及生产这些产品所用的原料众多,使得化学工业中的生产过程种类繁多,形成了众多的化工工艺。化学工程学科是研究化工生产过程中所涉及的化学过程及物理过程的基本规律并应用这些规律解决生产过程实际复杂问题的学科。目前,化学工程学科不仅涵盖整个化学与石化工业领域,而且也涵盖了许多与化工生产过程相同或相近的工业生产过程,如生物、材料、环境、制药、轻纺、冶金、食品等。

18 世纪前,化学品的制造主要为手工业操作,与实验室没有多大的差别。随着 18 世纪后手工业向大工业的过渡,化学工业的蓬勃发展推动了世界化学与化工高等教育的发展和进步。但此时的化工生产仅仅表现为专有技术,以研究某一产品的生产技术为对象,如硫酸、纯碱、烧碱、水泥、硅酸盐等,形成了各种工艺学。

1888 年,美国麻省理工学院首先在化学系内设置化学工程课程,之后开始设置化学工程系,其他国家随后也逐步建立了化学工程系。同时,人们认识到种类繁多的化工生产过程虽然具有多样性,但其共同特征是均可分解为若干相对独立的化学反应单元过程或物理加工单元过程。就反应的类型或特性而言,可归纳为若干基本的反应过程,如氧化、还原、加氢、脱氢、磺化、卤化、水解等,这些基本的反应单元称为单元过程。在单元过程中进行的物理加工处理操作,可归纳为流体流动与输送、搅拌、沉降、过滤、流态化、传热、蒸发、吸收、蒸馏、干燥、萃取、结晶等,形成了“化工单元操作”概念。化工原理是研究单元操作共性的课程。

1923 年,美国麻省理工学院的著名教授 W. H. 华克尔等人编写了第一部系统阐述化工单元操作的著作 *Principles of Chemical Engineering*,至今仍沿用“化工原理”这个名称。

20 世纪 50 年代,人们开始从本质上揭示各类单元操作的基本规律,开始系统研究单元操作中的传递现象,形成了动量传递、热量传递及质量传递的概念,建立了化工传递学的基础。1960 年,R. B. Bird 等的著作 *Transport Phenomena* 问世,系统阐述了动量、热量和质量传递的基本原理。同时,化学反应工程学也得到了系统的发展。因此,在化学工程领域形成了“三传一反”的概念,开辟了化学工程发展过程的第二个历程。

0.2 化工原理课程的内容和特点

化工原理课程是研究化工单元操作基本原理、典型的单元操作设备及其工艺设计的专业基础课,是化学工程学科体系中的基础课程之一,具有较强的工科特点。它综合运用数学、物理、物理化学等课程的基础理论知识,分析和解决化学加工类生产中各种物理过程的工程实际问题,承担着工程学科与工程技术的双重教育任务。

化工产品成千上万,每种产品均有自己特定的生产过程。但是,分析众多的生产过程可以发现,所有化工生产过程,除了每种产品特有的化学反应过程外,均由为数不多的基本单元操作所组成,如流体设备及输送、沉降、过滤、加热或冷却、蒸发、蒸馏、吸收、干燥、萃取、结晶等。由于各单元操作均遵循自身的规律和原理,并在相应的设备中进行,因此,单元操作包括过程原理和设备两部分内容。

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规律和工程目的,将其划分为表 0.1 所列的主要类型。除表中所列之外,还有热力过程(制冷)、粉体或机械过程(粉碎、分级)等单元操作。

表 0.1 化工中常用的单元操作

单元操作名称	目 的	原 理	基本过程(理论基础)
流体输送	液体、气体输送	输入机械能	流体动力过程 (动量传递)
沉 降	非均相混合物分离	密度差引起的相对运动	
过 滤	非均相混合物分离	介质对不同尺寸颗粒的截留	
搅 拌	混合或分散	输入机械能,使物质均匀混合或分散	
流 态 化	得到具有流体状态的特性	输入机械能,使固体颗粒悬浮	
换 热	加热、冷却或相变	输入或移出热量	传热过程 (热量传递)
蒸 发	溶剂与不挥发溶质分离	汽化溶剂,使物料浓缩	
蒸 馏	液体均相混合物分离	各组分挥发度的差异	传质过程 (质量传递)
气体吸收	气体均相混合物分离	各组分在溶剂中溶解度的差异	
萃 取	液态均相混合物分离	各组分在萃取剂中溶解度的差异	
浸 取	用溶剂从固体中提取物料	固体中组分在溶剂中溶解度不同	
吸 附	流体均相混合物分离	固体吸附剂对组分的吸附差异	
离子交换	从液体中提取某些离子	离子交换剂的交换离子	
膜 分 离	流体均相混合物分离	固体或液体膜的截留	热、质同时传递过程
干 燥	固体物料去湿	供热汽化液体,并将其及时移除	
结 晶	从溶液中析出溶质晶体	物质溶解度的差异	

从生产某种产品的意义上说,化学反应过程是生产过程的核心,但实际上,单元操作作为化学反应过程创造适宜条件和将反应产物分离制得纯净产品,在生产过程中占有极其重要的地位。通常,它们在工厂的设备投资和操作费用中占主要的比例,决定了整个生产的经济效益。

0.3 化工原理课程的研究方法

化工原理作为一门工程科学,其目的是解决真实的、复杂的生产实际问题。探求合理的研究方法是本课程的重要方面。在长期的发展过程中形成了两种基本研究方法,即实验研究法和数学模型法。

1. 实验研究法——经验法

在实际化工生产过程中,很多情况下难以用数学方程定量描述和分析、预测,而必须通过实验来解决,即所谓的实验研究法。该方法一般以量纲分析和相似论为指导,依靠实验建立过程参数之间的相互关系,而且通常是把各种参数的影响表示为若干个有关参数组成的、有一定物理意义的无量纲数群(准数、特征数,如雷诺数 Re)的影响。在本课程的学习过程中将会经常见到以无量纲准数表示的关系式。

对于较复杂的工程问题,在应用一般的实验研究方法不能解决放大问题时,只能采用逐级放大的方法,即先在小型实验装置上进行实验,确定各种因素的影响规律和适宜的工艺条件,然后进行中试规模的实验,最后进行示范装置的设计。逐级放大的级数或每级的放大倍数根据情况而异,依靠理论分析与实验确定。

2. 数学模型法——半经验半理论方法

数学模型法首先要对化工实际问题的机理作深入分析,从复杂的工程问题中排除非主要因素,抓住过程本质,作出合理的简化,建立基本能反映过程机理的物理模型和数学模型来解决工程实际问题。数学模型法所得结果通常包括反映过程特性的模型参数,还需实验确定,因而这是一种半经验、半理论的方法。

数学模型法可用于过程和设备的设计计算。由于数学模型法有理论的指导,且由于计算机技术的方法使得复杂数学模型的求解得以解决,因此,数学模型法已成为主要的研究方法。但使用数学模型描述的结果可能有一定的适用范围,具有一定的预测功能。

本课程中,两种方法并重,学习时,应仔细体会何时采用实验研究法,何时采用数学模型法。掌握这些方法,将有助于增强分析问题与解决化工生产过程实际问题的能力。

0.4 化工原理课程的基本概念

在计算和分析单元操作的问题时,经常会用到物料衡算、能量衡算、平衡关系和过程速率这四个基本概念,它们贯穿本课程始终,应熟练掌握并灵活运用。

1. 物料衡算(质量衡算)

物料衡算又称为质量衡算,它反映生产过程中各种物料,如原料、产物、副产物等之间的量的关系,是分析生产过程与每个设备的操作情况和进行过程与设备设计的基础。物料衡算的依据是质量守恒定律,即

输入物料的总量 = 输出物料的总量 + 过程积累的总量

在进行物料衡算时,要注意以下几个方面。

(1) 确定衡算系统。即衡算对象包括的范围。在工艺计算时,通常以一个生产过程为衡算系统;在设备计算时,以单一设备或其中一部分,或一组设备作为衡算系统。计算时,要确定衡算系统,列出衡算式,求解未知量。

(2) 确定衡算基准。一般选不再变化的量作为衡算的基准。如用物料的总质量或物料中某一组分的质量作为基准,对于间歇过程可用一批操作作为基准,在连续操作中则以单位时间作为基准。

(3) 确定衡算对象。对有化学变化的过程,衡算对象选择不发生变化的物质或某一个化学元素;在蒸馏操作中,可以选择某一组分作为衡算对象。

(4) 确定衡算对象的物理量和单位。在计算物料量时可以用质量或物质的量表示,但一般不宜用体积表示,特别是气体的体积随温度和压强的变化而变化。另外,还应注意在整个衡算过程中采用的单位要统一。

物料衡算是化工过程中最基本的计算,通过物料衡算可以为正确地选择生产过程的流程、计算原料消耗定额以及设备的生产能力和主要尺寸提供依据。

2. 能量衡算

依据能量守恒定律,把进、出某特定系统的各种能量的收支平衡关系建立起来,即称为能量衡算式。在单元操作和化工生产中,主要涉及物料的温度和热量的变化,同时,其他形式的能量(机械能、化学能、电能、磁能等)也可与热能之间相互转换,所以化工计算中最常见的是热量衡算。

热量衡算与物料衡算一样,既适用于物理变化过程,也适用于化学变化过程;既适用于化工生产整个系统,也适用于单个设备或一个过程。在热量衡算中要特别注意基准温度的选取。

通过热量衡算,可以计算单位产品的能耗,了解能量的利用和损失情况,确定生产过程中需要输入或向外界移出的热量,从而设计换热设备。

3. 平衡关系

认识过程的平衡关系,可以说明过程进行的方向和所能达到的极限程度。例如在传热过程中,当两物质温度不同,即温度不平衡时,热量就会从高温物质向低温物质传递,直到两物质的温度相等为止,此时过程达到平衡,两物质之间再也没有热量的净传递。热量从高温物质向低温物质传递,表明过程的方向;两物质温度相等的平衡状态则表示可能达到的极限程度。

在传质过程,如吸收过程中,当用清水吸收氨-空气混合物中的氨时,氨在两相间不平衡,空气中的氨将进入水中,当水中的氨含量增至一定值时,氨在气液两相间达到平衡,即不再有质量的净传递。

由以上可知,过程平衡可以用来判断过程能否进行、进行的方向以及能够达到的极限。

化工过程的平衡是化工热力学研究的问题,所以化工热力学这门课是化工原理的一门重要基础课。

4. 过程速率

过程速率是指过程进行的快慢,通常用单位时间内过程进行的变化量表示。

传热过程速率用单位时间内传递的热量或用单位时间内、单位面积上传递的热量表示;传质过程速率用单位时间内、单位面积上传递的质量表示。显然,过程传递速率越大,设备生产能力就越大,或在完成同样产量时设备的尺寸越小。过程速率和过程所处的状态与平衡状态的差异以及其他很多因素有关。过程所处的状态与平衡状态之间的差异通常称为过程的推动力,例如在两物质间的传热过程中,两物质的温度差就是过程的推动力;在传质过程中,某组分实际浓度与平衡浓度之差就是传质推动力。

过程传递速率通常可用下式表示:

$$\text{过程传递速率} \propto \frac{\text{推动力}}{\text{阻力}}$$

即过程传递速率与推动力成正比,与阻力成反比。过程阻力则取决于过程的机理,与过程的操作条件和物性有关。显然,提高推动力或减小过程阻力均可提高过程传递速率。提高推动力,如在流体输送过程中可以加大压强差或位差,在传热过程中可以提高温度差,在传质过程中可以提高浓度差;减少过程阻力,如在流体输送时可加大输送管道的直径,在两相流体传质过程中可以提高两相流体的推动程度。

0.5 化工原理课程的任务

本课程的目的旨在培养学生的工程观点、设计能力和创新能力,使学生掌握单元操作的基本原理,又能应用这些基本原理分析、处理工程实际问题。

具体地说,学生在学习本课程时,应注意以下几个方面能力的培养。

(1) 选型能力。根据生产工艺要求、物料特性和技术、经济特点,合理地选择单元操作及相应的设备。

(2) 设计计算能力。根据所选定的单元操作过程和设备进行过程的计算和设备设计,培养学生工程设计能力。

(3) 操作和调节生产过程的能力。学习化工单元操作方法和参数调节,了解强化和优化单元操作过程的能力。

(4) 过程开发或科学研究的能力。学习运用基本原理探索强化、优化或开发过程与设备的基本能力。

(5) 实验能力。学习实验设计、单元操作实验、数据处理、误差分析方法,提高动手能力和实验技能。

0.6 单位制及单位换算

任何物理量的大小都是由数值和计量单位来表达的,二者缺一不可。因此,物理量的单位与数值应一起纳入运算。

1. 单位制

1) 基本单位和导出单位

一般选择几个独立的物理量,并根据使用方便的原则规定出这些基本量的单位,称为基本单位,如质量单位 kg、长度单位 m、时间单位 s 等。而其他物理量的单位则根据其本身的物理意义,由有关基本单位组合而成,如速度单位 m/s、加速度单位 m/s^2 、密度单位 kg/m^3 等,这些由基本单位构成的单位称为导出单位。

2) 绝对单位制和重力单位(工程单位)制

绝对单位制以长度、质量、时间为基本物理量,力是导出物理量,其单位为导出单位;重力单位制以长度、时间和力为基本物理量,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定律相关联,即

$$F = ma$$

式中 F ——作用在物体上的力, N;

m ——物体的质量, kg;

a ——物体在作用力方向上的加速度, m/s^2 。

上述两种单位制中又有米制单位与英制单位之分。

3) 国际单位制

由于历史原因,对基本量的选择不同,或对基本单位的规定不同,产生了不同的单位制。长期以来,化工领域存在着多种单位制并用的局面,同一个物理量在不同的单位制中具有不同的数值与单位,给计算和交流带来了不便。为了改变这种局面,1960年10月第十一届国际计量大会通过了一种新的单位制度,称为国际单位制,符号为 SI。

在 SI 单位制中规定了七个基本单位,分别是长度(米, m),质量(千克, kg),时间(秒, s),热力学温度(开尔文, K),物质的量(摩尔, mol)以及化工领域不常用的电流(安培, A)和发光强度(坎德拉, cd)。专门名称的导出单位有力、重力(N 或 $\text{kg} \cdot \text{m/s}^2$),压强(压力)(Pa 或 N/m^2),能量、功、热(J 或 $\text{N} \cdot \text{m}$),功率(W 或 J/s),温度($^{\circ}\text{C}$)。

SI 制有两大优点:

(1) 通用性。所有物理量的单位都可由基本单位导出,SI 制对所有科学领域都适用。

(2) 一贯性。SI 制中任何一个导出单位都可由基本单位按照物理规律直接导出,无须引入比例常数。

2. 单位换算

单位换算是指同一性质的不同单位之间的数值换算。物理量由一种单位换算成另外一种单位时,只是数值改变,量本身无变化。换算时要乘以两单位的换算因数。

如: 1m 和 3.280 8ft(英尺)是两个相等的物理量,但使用单位不同则数值不同;又如, 1N 的力和 100 000dyn(达因)的力也是相等的。

第1章

流体流动

1.1 流体流动的研究方法

1.1.1 流体的连续介质假定

流体包括气体和液体。无论液体还是气体,都是由大量的彼此间有一定间隙的单个分子组成的,而且每个分子都处于无序的随机运动状态中。因此,从微观角度看,表征流体性质的物理量在空间和时间上的分布是不连续的,所需处理的运动是随机的,这就使问题变得复杂。但在工程技术领域,人们感兴趣的不是流体中单个分子的微观特性,而是流体的宏观运动特性,即大量分子的统计平均特性。在工程上可以取流体质点(或微团)为最小的考察对象,这就是流体的连续性假定。所谓流体质点是指由大量分子构成的微团,其尺寸远小于设备尺寸,却远大于分子自由程。这样,可以假定流体是由大量质点构成、彼此间无间隙、完全充满所占空间的连续介质。引入连续性假定后,流体的物理性质和运动参数均构成连续性变化特性,从而可以使用连续性函数的数学工具来描述和研究流体流动的规律。

需要指出,这样的连续性假定在绝大多数工程情况下是适用的,但对高真空稀薄气体的情况,这样的假定将不复成立。

同时,流体在运动时,与固体运动的主要区别在于各质点间可改变其相对位置,由此造成对流体运动规律在描述上的不同。

1.1.2 流体质点运动的考察方法

对于流体的流动,通常采用两种不同的描述方法。一种是选定一个流体质点,对其跟踪观察,描述其运动参数(如位移、速度等)与时间的关系,这种方法称作拉格朗日法。另一种是在固定空间位置上观察流体质点的运动情况(而不是跟踪流体质点进行观察),即描述各有关运动参数在指定空间和时间上的变化,如空间各点的速度、压强、密度等,称为欧拉法。例如对于速度可作如下描述:

$$\begin{cases} u_x = f_x(x, y, z, t) \\ u_y = f_y(x, y, z, t) \\ u_z = f_z(x, y, z, t) \end{cases} \quad (1.1)$$

式中 x, y, z ——位置坐标;

t ——时间;

u_x, u_y, u_z ——指定点速度在三个垂直坐标轴上的投影分量。

可见,拉格朗日法描述的是同一质点在不同时刻的状态;而欧拉法则描述的是空间各点都遵循的状态及其与时间的关系。需要指出的是,仅当所研究的是任意质点都遵循的一般规律时,才采用拉格朗日法;欧拉法是以充满运动质点的空间——流场为研究对象,研究各时刻质点在流场中的变化规律。由于化工生产要研究宏观上流体的流动规律,因此采用欧拉法对流体流动加以描述较为方便,尤其是空间各点的状态不随时间而变化的时候。

1) 定态与非定态流动

若运动空间各点的状态不随时间而变化,则该流动称为定态(稳态、定常)流动。对定态流动,指定点的速度以及压强等均为与时间无关的常数。反之,运动空间各点的状态随时间而变化,则该流动称为非定态(非稳态、非定常)流动。

2) 系统与控制体

系统(封闭系统)是指包含众多流体质点的集合。系统与外界环境可以有力的作用和能量的交换,但没有质量的交换。系统的形状和大小随流体的运动以及时间的变化而不同,由此可知,系统是采用拉格朗日法来考察流体的。

控制体是指在化工生产过程中,划定一固定空间体积(如某一化工设备)来分析问题。构成控制体的空间界面称为控制面。控制面是封闭的固定界面,但流体可自由进出控制体。同时控制面上可以有力的作用和能量的交换。因此,控制体是采用欧拉法来研究流体的。

3) 流场的描述

流体流动所占据的空间称为流场,流场由流线构成,而流线是采用欧拉法考察流体运动的结果。流线上各点的切线表示同一时刻各点的速度方向,流线表示的是同一瞬间不同质点的速度方向的连线。轨线(迹线)是指同一流体质点在不同时刻所占空间位置的连线,即某一流体质点的运动轨迹,是采用拉格朗日法考察流体运动所得的结果。只有当空间各点流体的速度不随时间而变化时,流线与迹线才重合。

1.1.3 作用在流体上的力

无论是静止的还是流动的流体均承受着一定的作用力。流动中的流体受到的作用力可分为两种:体积力和表面力。

体积力(质量力, body force) 指不与流体接触,而作用于流体每个质点上的力。体积力与流体的质量成正比,故又称为质量力。流体在重力场受到的重力与在离心力场受到的离心力都是典型的体积力,都是一种场力。

表面力(surface force) 指通过直接接触而作用于流体表面的力。表面力与作用的表面积成正比。若取流体中任意微小平面,则作用于其上的表面力可分解为垂直于表面的力——压力和平行于表面的力——剪力。

压力: 作用于单位面积上的压力称为流体的压强,习惯上也称为压力,而把作用于流体全部表面的压力称为总压强(或总压力)。其方向指向流体的作用面,单位为 N/m^2 ,也称为 Pa(帕斯卡),工程上常用兆帕(MPa)做压强的计量单位,即 $1\text{MPa}=10^6\text{Pa}$ 。

剪应力: 单位面积上的剪力称为剪应力,用符号 τ 表示。