

中国轻工业出版社

化工原理60讲

· 张言文 编著 ·

· 上册 ·



H U A G O N G Y U A N L I

化工原理 60 讲

(上册)

张言文 编著

中国轻工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

化工原理 60 讲 上册/张言文编著. —北京: 中国轻工业出版社, 1997. 9

ISBN 7-5019-2087-7

I. 化… II. 张… III. 化工原理-高等学校-教材 IV. TQ02

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (97) 第 05804 号

中国轻工业出版社出版发行

(100740 北京市东长安街 6 号)

责任编辑: 沈力匀

中国人民警官大学印刷厂印刷 新华书店经销

1997 年 9 月第 1 版 1997 年 9 月第 1 次印刷

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 16

字数: 366 千字 印数: 2200 册

定价: 25.00 元

内 容 提 要

全书以上、下册的形式介绍了典型的化工单元操作过程及设备的原理及计算方法。上册内容包括流体流动原理、流体输送机械、非均相分离、传热原理、蒸发；下册内容包括传质原理、吸收、精馏、传质塔设备、萃取、干燥等。各单元操作遵循过程分析、过程描述、过程计算的阐述方式，内容阐述简明扼要，突出了化工工程观点及研究方法。内容体系的组织采用单元法，设置单元演习。各讲末均给出课题要点，并附有适量的思考题和练习题。

本书既可作为高等院校化工类专业师生的教学参考书，也可作为学习化工单元操作的自学读本。

前 言

随着高校教学改革的深入发展,学校教学应从传授知识为主,转向在传授知识的同时,发展学生智能。如何“启迪智力,培养能力”,已成为教师教学研究中的一个重要课题。

以往多数《化工原理》的教材,都能较系统、全面地体现学科基本理论知识,它们适用于各种读者,是内容较丰富的知识源、材料源。但是在学校有限学时的教学中,为培养学生智能,做到精讲精练,教师需对上述教材做大量的重新组织、加工工作。因此,编写一套适宜的、内容少而精的教学用书是具有其必要性的。编者参阅了国内外有关的教材和专著,在多年讲稿的基础上编写了《化工原理 60 讲》,作为引玉之砖。

一、编写《化工原理 60 讲》的主要指导思想

依据高等院校工科本科《化工原理》课程基本要求,重新组织学科材料,力求少而精。不求学科知识的全面性,重在突出学科重点、基本观点和工程处理方法;不求包揽学生各教学环节的详尽知识和材料,而意在培养学生分析问题和解决问题的能力;并给教师在学科深度、广度以及教学风格上得以自主发挥的余地;编写方式利于自学和启发思考,当读者每学完一讲或者一个单元之后,知道能做些什么,并能进行自检。

二、主要编写特点

全书以“传递过程”的三传为主线安排各单元操作顺序,全书分 16 个教学单元,共 60 讲,每讲含一个或两个小专题,各专题既独立成讲,又相互联系构成相应各单元操作。各专题给出课题要点,并配有适量的、经过精心筛选的思考题和练习题;若干相关专题构成一个学习单元,每单元设置演习,内容有单元基本要求、自学课题、示范题、讨论题及单元自检题等。

突出工程研究方法-数学模型法和实验法的应用,并以此作为本书各单元操作的讨论主线。在一些典型过程的分析与描述中,详细阐述处理工程问题的要点。

各单元操作的阐述基本按如下三段式展开:过程分析——过程描述——过程及设备计算。过程分析=新的工程现象+已具有的物理、物化理论,形成一个特定化工过程;过程描述=定理及定律+辅助定则(过程特征),重在过程特征规律的描述;过程及设备的计算分为设计型计算和操作型计算,突出不同计算中的特殊问题及其处理方法。

在不影响理解的前提下,压缩了图表,力求文字精练。书中所列图表主要用于说明观点、解释现象。

在本书成书过程中,得到孙宝国研究员的鼎力支持,冯旭东同志为书中练习题做了题解,同时得到其他同行同志的指教,在此表示衷心感谢。另外,书中的部分例题、思考题及练习题选自有关教科书,特在此说明并表示谢意。

书中错误和不妥之处,请批评指正。

编者于 1996 年 6 月

目 录

绪 论 篇

第一讲 绪论	1
1.1 课程概述	1
1.2 过程分析与描述的基本方法	3
1.3 单位与单位换算	4
【本讲要点】	5
【练习题】	5

动量传递篇——流体流动原理

第二讲 流体流动概述 流体静力学	6
2.1 流体流动概述	6
2.2 流体静力学	8
【本讲要点】	12
【思考题】	13
【练习题】	13
第三讲 单元演习一	15
【基本要求】	15
3.1 自学内容	15
3.2 讨论题目	20
第四讲 流体流动中的守恒原理	22
4.1 概念	22
4.2 质量守恒与连续性方程	22

4.3 广义的 Bernoulli 方程	23
【本讲要点】	27
【思考题】	27
【练习题】	27
第五讲 流体流动现象	30
5.1 流体粘性与牛顿粘性定律	30
5.2 流动类型	32
5.3 圆管内的速度分布 (侧型)	33
5.4 边界层概念	36
【本讲要点】	38
【思考题】	39
【练习题】	39
第六讲 流体流动中的阻力损失	41
6.1 均匀直管摩擦阻力损失通用表达式	41
6.2 摩擦因数	42
6.3 非圆形管道的当量直径	46
6.4 局部阻力损失	46
【本讲要点】	48
【思考题】	48
【练习题】	48
第七讲 单元演习二	50
【基本要求】	50
7.1 自学内容	50
7.2 讨论题目	59
第八讲 流体输送管路的计算	60
8.1 简单管路计算	60
8.2 复杂管路计算	62
【本讲要点】	65
【思考题】	65
【练习题】	66
第九讲 守恒原理在流体测量中的应用	68
9.1 毕托管测速计	68
9.2 孔板流量计	68
9.3 文丘里 (Venturi) 流量计	71
9.4 转子流量计	71
【本讲要点】	73
【练习题】	74
第十讲 单元演习三	75
【基本要求】	75
10.1 示范例题	75

10.2 讨论题目	78
10.3 自检题	79

动量传递篇——流体输送机械

第十一讲 流体输送机械概述 离心泵特性	81
11.1 流体输送机械概述	81
11.2 离心泵特性	82
【本讲要点】	87
【思考题】	87
【练习题】	87
第十二讲 离心泵在管路中的运行	89
12.1 工作点与流量调节	89
12.2 离心泵的组合操作	90
12.3 吸上高度(或安装高度)	91
12.4 离心泵的选择	93
【本讲要点】	93
【思考题】	93
【练习题】	94
第十三讲 其他流体输送机械	96
13.1 流体输送机械的分类及主要特点	96
13.2 往复泵	96
13.3 离心通风机	99
【思考题】	101
【练习题】	102
第十四讲 单元演习四	103
【基本要求】	103
14.1 示范例题	103
14.2 讨论题目	106
14.3 自检题	107

动量传递篇——非均相分离

第十五讲 沉降运动 沉降分离	108
15.1 概述	108
15.2 沉降运动理论	109
15.3 沉降分离设备	113
【本讲要点】	116
【思考题】	116
【练习题】	117
第十六讲 流体通过颗粒层的流动 过滤理论	118
16.1 概述	118

16.2 过滤理论	119
【本讲要点】	123
【思考题】	124
【练习题】	124
第十七讲 过滤计算	126
17.1 常用过滤设备	126
17.2 过滤计算	128
【本讲要点】	130
【思考题】	130
【练习题】	131
第十八讲 单元演习五	133
【基本要求】	133
18.1 示范例题	133
18.2 讨论题目	136

热量传递篇——传热原理

第十九讲 传热概述 热传导	138
19.1 传热概述	138
19.2 热传导	140
【本讲要点】	145
【思考题】	145
【练习题】	146
第二十讲 无相变对流给热	147
20.1 过程分析	147
20.2 过程描述方法	147
20.3 α 关联式的建立方法	149
20.4 无相变对流给热系数 α 的经验关联式	151
【本讲要点】	154
【思考题】	154
【练习题】	154
第二十一讲 单元演习六	156
【基本要求】	156
21.1 自学内容	156
21.2 讨论题目	160
第二十二讲 有相变对流给热过程	161
22.1 蒸汽冷凝给热	161
22.2 液体沸腾给热	165
【本讲要点】	167
【思考题】	168
【练习题】	168

第二十三讲 热辐射	169
23.1 基本概念	169
23.2 基本定律	169
23.3 两物体间的辐射传热	172
23.4 气体辐射特点	173
23.5 对流和辐射的联合传热计算	174
【本讲要点】	174
【思考题】	175
【练习题】	175
第二十四讲 传热计算 设计型计算	176
24.1 传热系数	176
24.2 传热温度差	178
24.3 换热器的设计计算	180
【本讲要点】	183
【思考题】	184
【练习题】	184
第二十五讲 换热器的操作型计算 传热过程的强化途径	185
25.1 操作型计算的提法与解法	185
25.2 换热器的调节	185
25.3 传热单元数 (NTU) 法	186
25.4 壁温的估算	188
25.5 传热过程的强化途径	188
【本讲要点】	189
【思考题】	189
【练习题】	190
第二十六讲 单元演习七	191
【基本要求】	191
26.1 示范例题	191
26.2 讨论题目	197
26.3 自检题	197

热量传递篇——蒸发

第二十七讲 蒸发概述 单效蒸发	199
27.1 蒸发概述	199
27.2 单效蒸发计算	200
【本讲要点】	203
【思考题】	204
【练习题】	204
第二十八讲 蒸发器 蒸发单元操作的经济性	205
28.1 蒸发器的类型	205

28.2 蒸发单元操作的经济性	206
【本讲要点】	209
【思考题】	210
【练习题】	210
第二十九讲 多效蒸发计算	211
29.1 多效蒸发过程分析	211
29.2 多效蒸发计算	212
【本讲要点】	215
【思考题】	215
【练习题】	215
第三十讲 单元演习八	216
【基本要求】	216
30.1 示范例题	216
30.2 讨论题目	223
附录	224
1. 常用的单位换算	224
2. 干空气的物理性质 ($p=0.101\text{MPa}$)	226
3. 水的物理性质	226
4. 水在不同温度下的粘度	227
5. 某些固体材料的导热系数	228
6. 液体的粘度和密度	229
7. 气体的粘度 ($p=0.101\text{MPa}$)	231
8. 液体的比热容	232
9. 蒸发潜热 (汽化热)	233
10. 某些有机液体相对密度 (液体密度与 277K 时水的密度之比)	235
11. 1atm 压下溶液的沸点升高与浓度的关系	236
12. 泵规格 (摘录)	237
13. 4-7-11 型离心通风机规格 (摘录)	240
14. 某些物质的阿托因常数	240
15. 几种常用体系气液平衡数据	240

绪 论 篇

第一讲 绪 论

1.1 课程概述

1.1.1 课程的发展

“化工原理”（也称“单元操作”或“化工过程及设备”）课程与“化学工程学”的发展密切相关。为了学好化工原理，梗概了解课程的来龙去脉，及其与邻近学科的关系是非常有用的。为此，先简单介绍化学工程学的发展。

工程学科的形成源于工业生产。19世纪末，逐步形成的各种化工产品的工艺学，正是当时以产品划分的化工生产的写实，这在后来集合为“工业化学”课程。1915年，化学工程的先驱 A. D. Lihle 在向 MIT 提交的一份报告中写道：“……任何化学过程，不论是什么样的规律，总可以分解为一系列互相类同的被称作‘单元操作 (Unit operation)’的组成部分，如破碎、混合、加热、吸收、沉淀、结晶、过滤等等。这些基本单元操作的数目并不多，对于一个特定的加工过程，可能只包括它们之中的某几个。要使化学工程师们能广博地适应职业的需要所应具备的能力，只能是对实际规模上所进行的过程作出分析并将其分成多个单元操作来获得。……”。1922年，在美国的化学工程师年会上，单元操作的概念被法定认可。次年，MIT 的著名教授 W. H. Walker 等人按此概念写成了第一部关于单元操作的书，名为 Principles of chemical engineering (化工原理)。从以产品来划分的化工生产工艺中，抽象出各种单元操作，即从特殊性中总结出普遍性，是认识上的一个飞跃，对化学工程学的形成和发展起了重要推动作用，并促进了化学工业的发展。

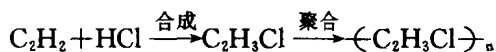
此后很长时期，在化工设计及单元操作研究中发现动量传递（流体力学）、热量传递与质量传递现象在许多过程中同时发生，并且三种传递现象有类似性。这使得原来本是分立学科的流体力学（动量传递）、传热学与传质学合而为一，构成一个新的基础学科成为必要。1960年，威斯康新大学的 Bird 等人为了加强学生工程科学基础的训练，把三种传递过程的内容组织在一起写成了 Transport phenomena (传递现象) 一书，并认为它作为一门基础科学，对所有工程学科都是有用的。与此同时，化工生产中的化学反应过程经过了由“单元过程”到“化学反应工程学”的发展。至此，化学工程学学科发展到了“三传一反”的较完整阶段。

20世纪60年代末，由于计算机的迅速发展与普及，使人们对化工单元的研究扩展到化工生产过程的系统优化设计、操作以及控制。运筹学与优化理论的结合并用于化工过

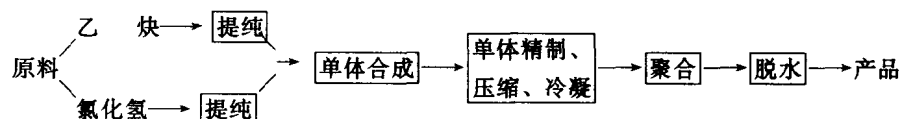
程，形成了“化工系统工程学”，同时发展了“过程动态学与控制论”。这些，都丰富与发展了化学工程学的內容。

下面以聚氯乙稀生产为例，图示上述內容。

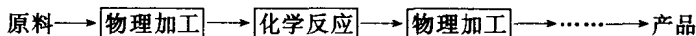
化学原理：



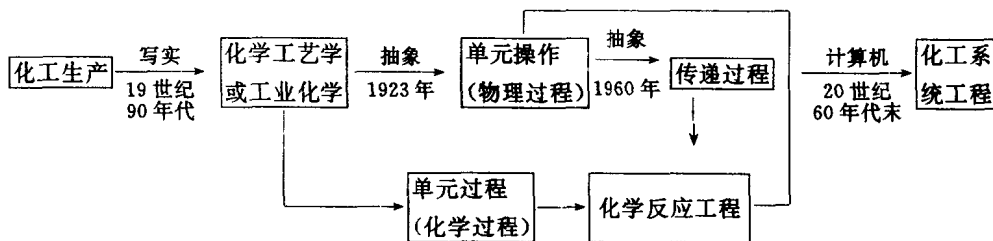
生产过程：



一般化过程：



学科的发展：



1.1.2 课程内容

作为一门技术基础课，“化工原理”研究的是化工生产过程中共有物理过程的原理及设备。全课內容可以以传递过程作为横向主线进行分类划分，具体见表 1-1 所示。

表 1-1 传递过程与典型单元操作

传递过程	单元操作
动量传递	物料加压、减压和输送 非均相混合物分离：沉降、过滤
热量传递	物料加热或冷却、汽化或冷凝 溶剂与不挥发性溶质分离：蒸发
质量传递	均相混合物分离：吸收、蒸馏、萃取 固体物料去湿：干燥（热、质同时传递）

1.1.3 单元操作的研究方法

“化工原理”是一门工程性较强的课程，所以从研究方法上讲，与一般工程学科研究方法相似，有实验法（经验法）与数学模型法（半理论半经验法）。值得指出的是，虽然近年来由于计算机的普及，化工过程及设备的计算机模拟有了大幅度的发展，并且愈益受到人们的重视，但是从目前状况看，它仍然是一门实验学科。其主要原因是由于一些过程的复杂性，致使列不出方程式，或即使能列出，也因存在众多错综复杂的工程因素，致使列不出必要的边界条件，而无法求解。这里应强调的是，通过实验求得关联式的过程也需要在正确理论与观点的指导下进行，其中包括要有正确的过程原理与实验规

划。这些研究方法是我们在学习中应当充分注意的，并且是本课程教学的纵向主线。

上述两种研究方法可用图 1-1 给出概貌，其详细情况，在以后各讲中及实验教学中深入讨论。

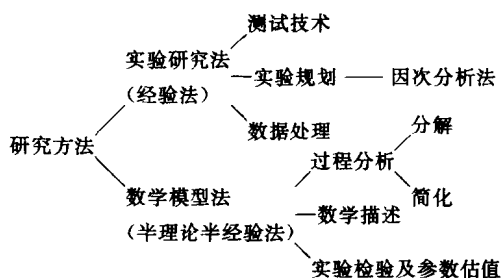


图 1-1 研究方法概貌

1.1.4 教学目标与方法

在后续各讲中，我们将以传递过程为横向主线来安排各单元操作顺序，以研究方法为纵向主线展开各单元操作内容。教学的主要目标是：

- (1) 对各单元操作过程做到过程清楚、原理清楚。
- (2) 掌握选择与发展化工过程与设备的基本方法与原则。
- (3) 能分析与解决典型化工单元操作中的实际问题（包括设计问题与操作分析问题）。

- (4) 了解强化过程的途径。

为保证以上目标的实现，采取以下教学措施与方法：

- (1) 整个课程力求采用精讲精练的方式。讲课与演习的学时比例约为 3 : 1。
- (2) 讲授内容强调过程的工程性质和工程处理方法，突出过程特征，揭示过程各部分内容的内在联系，启发举一反三。凡学生通过自学或通过思考能弄清楚的内容，少讲或不讲。
- (3) 设置单元演习课。演习课不是简单的多做题，而是演习经选择的有思想、有层次的题目。演习课采用自学、讨论、测验、自检等多种形式，训练与发展智能。

1.2 过程分析与描述的基本方法

解析程度是学科成熟的标志。虽然化工原理课中经验关联式不少，但过程数学模型的建立是本课程的重要组成部分。掌握过程分析与数学描述的方法对学好本课程、培养分析与解决问题的能力无疑是有益的。

本教科书中对各单元操作的阐述方式基本按如下三段式：过程分析——过程描述——过程计算。单元操作过程分析的基本方法是：已有物理、物化及数学基本理论+新的工程现象→发展一个过程。单元操作过程与描述方法可以概括为：基本物理定律的应用+过程特征规律的寻求。几个在化工中常用的基本物理定律及对应的方程式如下：

基本定律	对应方程
质量守恒定律	物料衡算或连续性方程
牛顿第二运动定律	力衡算方程（或动量衡算方程）
热力学第一定律	能量或热量衡算方程

为了完整地描述一个过程，除了应用上述基本物理定律外，还要寻求描述特定过程本身规律的定则，或称辅助定则。如理想气体状态方程、牛顿粘性定律等。这些辅助定则与过程本身状况及流体性质相关，而基本物理定律是普适的，与过程及流体无关。这样，就可以在了解基本物理定律的应用方法后，集中注意力去寻求与过程机理相关的辅助定则，最后，得出描述整个过程的完整数学模型。这是在学习化工原理课程中应当掌握的一种基本方法。

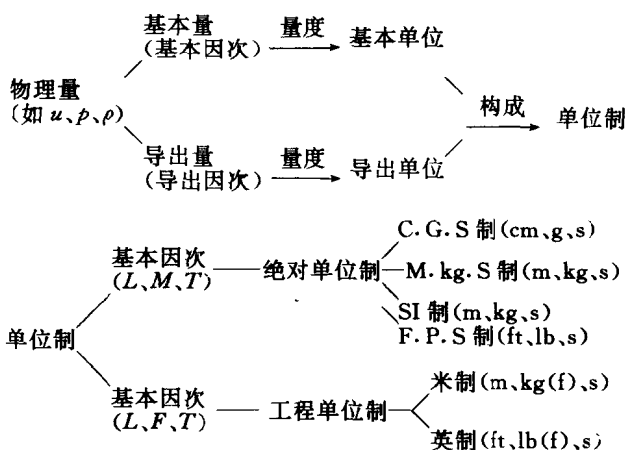
过程计算分设计型计算与操作型计算，并突出不同计算中的处理方法。

1.3 单位与单位换算

1.3.1 单位与单位制

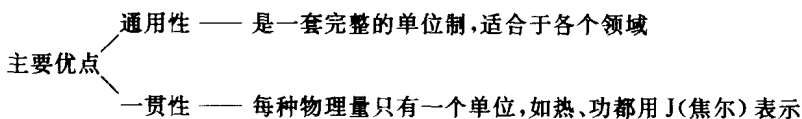
国际上趋向于采用 SI 单位制（国际单位制）。1986 年，中国颁布以国际单位制为法定计量单位基础的国家标准 GB3100~3102-86，1993 年修订为 GB3100~3102-93。但由于历史原因，现在仍是几种单位制并存。因此，了解各种单位制情况，并能熟练地将非法定计量单位换算为法定计量单位是非常必要的。

下面只以简单的联络方式给出，以供复习参考。换算技巧应在反复练习中掌握。



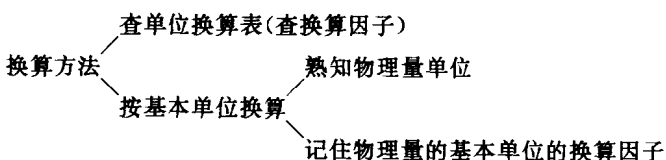
SI 制

基本单位——m（长度）、kg（质量）、s（时间）、K（温度）、A（电流）、cd（光强度）、mol（物质的量）



1.3.2 单位换算

换算因子——彼此相等而各有不同单位的两个同名物理量之比。如 1m 和 1000mm 的换算因子为 1000（或 1/1000）



同时在单位换算中应注意，物理方程中的物理量必须使用同一单位制中的单位，经

验方程则必须采用该方程指定的单位。

【本讲要点】

▲化工原理或单元操作是化学工程学的分支，它研究化工生产中共有的物理操作过程的基本原理、典型设备及其选用、计算方法，是一门工程性较强的技术基础课。它具有与一般工程学科相似的研究方法，即实验法与数学模型法。

▲本课程以传递过程为横向主线，划分与安排各讲教学内容；以研究方法为纵向主线，展开各单元操作内容的讨论。

▲过程清楚、能分析与解决典型单元操作过程中的实际问题是教学的主要目标，教学方式是精讲精练。

▲各单元操作过程的过程分析及描述是本课的重要内容。过程分析的基本方法是：已有物理、物化及数学理论+新的工程现象→发展一个过程；过程描述的基本方法是：基本物理定律+辅助定则（过程特征）；过程计算分设计型计算与操作型计算。

▲了解各种单位制及熟悉单位换算是学好本课的必备技巧，应在学习中逐步掌握。

【练习题】

1-1. 进行下列单位换算（要求根据基本单位之间的变换关系，不能直接用单位换算表）：

(1) 30℃时水的表面张力 $\sigma=71\text{dyn/cm}$ ，将此 cgs 单位换算成 SI 单位。

(2) 30℃时水的粘度 $\mu=0.008\text{g/cm}\cdot\text{s}$ ，将此 cgs 单位换算成 SI 单位。

(3) 某吸收过程的传质系数 $K_G=1.6\text{kmol}/(\text{m}^2\cdot\text{h}\cdot\text{atm})$ ，换算成 SI 单位： $\text{kmol}/(\text{m}^2\cdot\text{h}\cdot\text{Pa})$ 。

1-2. 粘度 μ 的定义由牛顿粘性定律 $\tau=\mu\frac{du}{dy}$ 得出，其中 τ 为剪切应力（即单位面积上的剪应力）， du/dy 为速度梯度。

(1) 推出 μ 在 SI 制中的单位和因次式。

(2) 20℃时水的粘度为 1cP，试换算成 SI 单位制。

（注：1cP=0.01dyn·s/cm²）

1-3. 试将下列物理量换算成指定单位：

质量：1.5kgf·s²/m = _____ kg

密度：13.6g/cm³ = _____ kgf·s²/m⁴ = _____ kg/m³

压力：35kgf/cm² = _____ lbf/in² = _____ 物理大气压 = _____

工程大气压 = _____ mmHg = _____ Pa

能量：130Btu（英热单位） = _____ kcal = _____ kgf·m = _____ J

功率：10hp = _____ kgf·m = _____ kW

比热容：2Btu/lb·°F = _____ kcal/(kg·°C)

流量：2.5L/s = _____ m³/s

表面张力：70dyn/cm = _____ kgf/m = _____ N/m

动量传递篇——流体流动原理

第二讲 流体流动概述 流体静力学

2.1 流体流动概述

化工生产中所涉及的物料及产品中以流体占大多数。所以，流体的输送是化工过程中的普遍问题。这就需要研究流体的流动规律，以便进行管路的设计、输送机械的选择及所需功率的计算。另外，化工设备中的传热、传质及化学反应过程大多数在物料流动状态下进行，故过程进行的程度与流体流动状态密切相关。因此，本章着重讨论的有关流体流动过程的基本原理及流体在管内流动的基本规律，是本门课程的重要基础。

2.1.1 物理力学基础

在物理力学中已熟知：

①单质点的运动规律及质点受力产生加速度的规律——牛顿第二运动定律：

$$\Sigma \vec{F} = \frac{d(m\vec{u})}{dt}$$

②质点运动的守恒原理，如机械能守恒等。

这些规律具有普遍性，同样适于流体流动规律的研究。

2.1.2 流体流动的考查方法

面对对象与连续性假设

我们将要研究的流体（不管是气体还是液体），是由大量彼此间具有一定间隙的分子组成的，是杂乱运动的体系。如果我们研究单个分子的随机运动，会使问题非常复杂，而且在一般工程问题中，往往勿须知道单个流体分子的行为。这样，我们可以将流体视为由无数质点（分子团）组成的连续介质，流体的物性及运动参数在流动空间连续分布，从而可以使用连续函数的数学工具加以描述。实践证明，流体连续性的假设，在大多数情况下合适。当然，这一假设对在高度真空下的气体是不适宜的。

流体运动的描述方法

流体与固体运动的重要区别在于流体流动时各质点相对位置的改变。根据流体流动空间着眼点的不同（或规定考查位置的不同），有下述两种考查方法。

(1) Lagrange 法与轨迹

这种方法着眼于流体个别质点的运动。通过考查空间各个流体质点的位置、速度和压力随时间的变化，了解整个流体流动规律。即此法描述的是同一质点在不同时刻的状态，是某质点的运动轨迹——轨迹或轨线是用 Lagrange 法考查流体运动所得的结果。在