

 普通高等教育“十二五”国家级规划教材配套学习用书

化工原理学习指导

(第二版)

马江权 冷一欣 编
韶 晖 杜 郢

 华东理工大学出版社
EAST CHINA UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY PRESS

普通高等教育“十二五”国家级规划教材配套学习用书

化工原理学习指导

(第二版)

马江权 冷一欣 编
韶 晖 杜 郢



 华东理工大学出版社
EAST CHINA UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY PRESS

· 上海 ·

图书在版编目(CIP)数据

化工原理学习指导/马江权等编. —2 版. —上海:
华东理工大学出版社, 2012. 8

ISBN 978-7-5628-3328-4

I. ①化… II. ①马… III. ①化工原理-高等学校-教学参考资料 IV. ①TQ02

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 193119 号

普通高等教育“十二五”国家级规划教材配套学习用书

化工原理学习指导(第二版)

编 者 / 马江权 冷一欣 韶 晖 杜 郢

策划编辑 / 焦婧茹

责任编辑 / 赵子艳

责任校对 / 张 波

封面设计 / 裘幼华

出版发行 / 华东理工大学出版社有限公司

社 址: 上海市梅陇路 130 号, 200237

电 话: (021)64250306(营销部)

(021)64252009(编辑室)

传 真: (021)64252707

网 址: press.ecust.edu.cn

印 刷 / 常熟新骅印刷有限公司

开 本 / 787 mm×1092 mm 1/16

印 张 / 19.75

字 数 / 666 千字

版 次 / 2007 年 10 月第 1 版 2012 年 8 月第 2 版

印 次 / 2012 年 8 月第 1 次

书 号 / ISBN 978-7-5628-3328-4

定 价 / 39.80 元

联系我们: 电子邮箱 press@ecust.edu.cn

官方微博 e.weibo.com/ecustpress

前 言

“化工原理”是一门工程性、实用性很强的课程。在课程内容中,既有详细的过程分析,又有大刀阔斧的粗描概略;既有详尽的理论分析,又有许多的经验总结。本课程作为一门专业基础课,起着承前启后的作用,对于帮助学生建立基本的工程观点、培养专业的学习兴趣至关重要。其特点是信息量大、公式多、工程性强,练习分量重,学习过程中会碰到许多困难。编写本书的宗旨是帮助读者深刻理解教材的重要内容,牢固掌握基础知识和基本原理,灵活应用这些基本规律去解决工程实际问题,同时提高读者自学能力、知识水平和应试能力。

本书共分8章,包括流体流动及输送机械、搅拌沉降过滤及流态化、传热蒸发、吸收及吸收塔、精馏及精馏塔、萃取、干燥及其他传质分离方法和试题集锦等内容。每章包括基本要求与学习目标、基本概念、重要公式、主要内容联系图、要点指导、注意点、主要概念解析、典型例题详解和自测练习等几部分内容。内容筛选上既注重“三基”的基本教学要求,又顾及部分同学考研复习加深的需要,题目有难有易,读者可各取所需。

本书由马江权主编统稿,冷一欣、杜郢、韶晖分别参与完成了第6章和第7章、第4章、第5章内容的编写,杨德明、姚超和王岚等对教材的编写提出了许多宝贵意见。

本书是由我校化工原理全体教师在多年教学经验的基础上编写而成的,编写时也吸取了众多兄弟院校的宝贵经验,在此谨表谢意。

由于编者学识有限,本书难免有疏漏和不足之处,恳请读者指正,以便今后改进。

编 者

2012年6月

目 录

1 流体流动及输送机械	1
1.1 基本知识	1
1.1.1 基本要求与学习目标	1
1.1.2 基本概念	1
1.1.3 重要公式	4
1.1.4 主要内容联系图	7
1.1.5 本章要点指导	9
1.1.6 本章注意点	10
1.2 概念题	11
1.2.1 简答及分析题	11
1.2.2 思考题	18
1.2.3 选择题	20
1.3 典型例题详解	24
1.4 自测练习题	48
1.4.1 判断题	48
1.4.2 填空题	49
1.4.3 选择题	51
1.4.4 计算题	55
2 搅拌沉降过滤及流态化	59
2.1 基本知识	59
2.1.1 基本要求与学习目标	59
2.1.2 基本概念	59
2.1.3 重要公式	61
2.1.4 主要内容联系图	62
2.1.5 本章要点指导	63
2.1.6 本章注意点	64
2.2 概念题	64
2.2.1 简答及分析题	64
2.2.2 思考题	66
2.2.3 选择题	67
2.3 典型例题详解	69
2.4 自测练习题	76
2.4.1 判断题	76
2.4.2 填空题	77
2.4.3 选择题	78
2.4.4 计算题	80

3 传热蒸发	82
3.1 基本知识	82
3.1.1 基本要求与学习目标	82
3.1.2 基本概念	82
3.1.3 重要公式	84
3.1.4 主要内容联系图	85
3.1.5 本章要点指导	87
3.1.6 本章注意点	89
3.2 概念题	90
3.2.1 简答及分析题	90
3.2.2 思考题	95
3.2.3 选择题	96
3.3 典型例题详解	100
3.4 自测练习题	118
3.4.1 判断题	118
3.4.2 填空题	119
3.4.3 选择题	120
3.4.4 计算题	122
4 吸收及吸收塔	126
4.1 基本知识	126
4.1.1 基本要求与学习目标	126
4.1.2 基本概念	127
4.1.3 重要公式	128
4.1.4 主要内容联系图	129
4.1.5 本章要点指导	130
4.1.6 本章注意点	131
4.2 概念题	132
4.2.1 简答及分析题	132
4.2.2 思考题	134
4.2.3 选择题	136
4.3 典型例题详解	138
4.4 自测练习题	149
4.4.1 判断题	149
4.4.2 填空题	150
4.4.3 选择题	151
4.4.4 计算题	152
5 精馏及精馏塔	155
5.1 基本知识	155
5.1.1 基本要求与学习目标	155

5.1.2	基本概念	155
5.1.3	重要公式	157
5.1.4	主要内容联系图	158
5.1.5	本章要点指导	160
5.1.6	本章注意点	162
5.2	概念题	162
5.2.1	简答及分析题	162
5.2.2	思考题	164
5.2.3	选择题	166
5.3	典型例题详解	168
5.4	自测练习题	185
5.4.1	判断题	185
5.4.2	填空题	186
5.4.3	选择题	188
5.4.4	计算题	189
6	萃 取	192
6.1	基本知识	192
6.1.1	基本要求与学习目标	192
6.1.2	基本概念	192
6.1.3	重要公式	193
6.1.4	主要内容联系图	194
6.1.5	本章要点指导	194
6.1.6	本章注意点	195
6.2	概念题	195
6.2.1	简答及分析题	195
6.2.2	思考题	197
6.2.3	选择题	198
6.3	典型例题详解	198
6.4	自测练习题	210
6.4.1	判断题	210
6.4.2	填空题	210
6.4.3	选择题	210
6.4.4	计算题	211
7	干燥及其他传质分离方法	213
7.1	基本知识	213
7.1.1	基本要求与学习目标	213
7.1.2	基本概念	213
7.1.3	重要公式	215
7.1.4	主要内容联系图	216
7.1.5	本章注意点	217

7.2	概念题	217
7.2.1	简答及分析题	217
7.2.2	思考题	218
7.2.3	选择题	218
7.3	典型例题详解	219
7.4	自测练习题	232
7.4.1	判断题	232
7.4.2	填空题	232
7.4.3	选择题	233
7.4.4	计算题	234
8	试题集锦	236
8.1	化工原理试题	236
8.1.1	化工原理试题(1)	236
8.1.2	化工原理试题(2)	239
8.1.3	化工原理试题(3)	241
8.1.4	化工原理试题(4)	244
8.2	化工原理(少学时)试题	246
8.2.1	化工原理试题(1)	246
8.2.2	化工原理试题(2)	249
8.2.3	化工原理试题(3)	252
8.3	化工原理考研试题	256
8.3.1	化工原理考研试题(1)	256
8.3.2	化工原理考研试题(2)	258
8.3.3	化工原理考研试题(3)	260
8.3.4	化工原理考研试题(4)	263
8.3.5	化工原理考研试题(5)	265
参考答案		268
参考文献		304

1 流体流动及输送机械

流体流动的基本规律是“化工原理”这门课程的重要基础,学好这部分内容,将有助于另外“二传”(能量、质量传递)及其相关单元操作的学习。流体流动和流体输送机械联系紧密,因此本书将两章内容编排在一起。

应当指出,“化工原理”是一门实用工程学科,在掌握本课程基本理论的基础上,应注意学用结合,不断培养自己分析问题和解决实际工程问题的能力。演算大量习题不失为一个重要而有效的方法。

1.1 基本知识

► 1.1.1 基本要求与学习目标

1. 基本要求

- (1) 掌握流体静力学方程及其应用。
- (2) 掌握宏观质量衡算方程及其应用。
- (3) 熟练掌握机械能衡算方程及其应用。
- (4) 掌握压力压差测量、流速流量测定所使用的仪表的原理、构造和性能特点。
- (5) 掌握离心泵的基本结构、工作原理、主要特性参数、特性曲线及其应用、流量调节、串并联特性、泵的安装、操作注意事项及选型等。
- (6) 了解往复泵、旋涡泵等的工作原理、特性、流量调节方法、安装要点及适应范围等(与离心泵相对照)。
- (7) 了解压缩机、鼓风机、通风机的原理、特点及选用;了解离心通风机的特性参数;懂得往复压缩机的几个基本概念:压缩比、多级压缩、余隙系数等,了解真空泵的主要性能及选用。

重点 静力学方程及其应用;宏观质量衡算方程及其应用;机械能守恒方程及其应用;流动形态;边界层概念;量纲分析法;离心泵的特性和选用。

难点 机械能的守恒和转换;边界层分离;离心泵的基本方程;离心泵的安装高度。

2. 学习目标

- (1) 掌握输送流体所需要的能量。
- (2) 进行简单、复杂管路的设计型、操作型问题的分析及计算。
- (3) 进行流体流速与流量的计算。
- (4) 根据生产任务选择适宜的设备类型和型号,以便经济地完成输送任务。
- (5) 根据操作条件的变化,分析或计算输送设备的输送能力的变化。

► 1.1.2 基本概念

质点 含有大量分子的流体微团,其尺寸远小于设备尺寸,但比起分子自由程却要大得多。

连续性假定 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。

拉格朗日法 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。

欧拉法 在固定空间位置上观察流体质点的运动情况,如空间各点的速度、压强、密度等,即直接描述各有关运动参数在空间各点的分布情况和随时间的变化。

拉格朗日法和欧拉法的区别 前者描述同一质点在不同时刻的状态;后者描述空间任意定点的状态。

定态流动 流场中各点流体的速度 u 、压强 p 不随时间变化而变化。

轨线与流线 轨线是同一流体质点在不同时间的位置连线,是拉格朗日法考察的结果。流线是同一瞬间不同质点在速度方向上的连线,是欧拉法考察的结果。如陨星下坠时在天空划过的白线是轨线,烟囱里冒出的烟是流线。

系统与控制体 系统是采用拉格朗日法考察流体。控制体是采用欧拉法考察流体。

理想流体与实际流体的区别 理想流体黏度为零,而实际流体黏度不为零。

黏性的物理本质 分子间的引力和分子的热运动。通常气体的黏度随温度上升而增大,因为气体分子间距离较大,以分子的热运动为主;温度上升,热运动加剧,黏度上升。液体的黏度随温度增加而减小,因为液体分子间距离较小,以分子间的引力为主,温度上升,分子间的引力下降,黏度下降。

静压强的特性 ①静止流体中任意界面上只受到大小相等、方向相反、垂直于作用面的压力;②作用于任意点所有不同方位的静压强在数值上相等;③压强各向传递。

总势能 流体的静压能与位能之和。

可压缩流体与不可压缩流体的区别 流体的密度是否与压强有关。有关的称为可压缩流体,无关的称为不可压缩流体。

牛顿流体与非牛顿流体的区别 流体行为是否符合牛顿黏性定律,符合的为牛顿流体,不符合的为非牛顿流体。

柏努利方程的物理意义 流体流动中的位能、压强能、动能之和保持常数。

柏努利方程的几何意义 流体流动中以流体柱高度表示的位头、压头、速度头之和保持不变。

柏努利方程的应用条件 ①重力场,定态流动,不可压缩的理想流体沿轨线;②无外加机械能或机械能输出。在实际过程中,如果距离较短、阻力损失较小,可以忽略时,就可以考虑用来解决实际流体的流动问题,如重力射流、压力射流、虹吸等过程。

平均流速 流体的平均流速是以体积流量相同为原则的。

动能校正因子 实际动能之平均值与平均速度之动能的比值。

均匀分布 同一横截面上流体速度相同。

均匀流段 各流线都是平行的直线并与截面垂直,在定态流动条件下该截面上的流体没有加速度,故沿该截面势能分布应服从静力学原理。

层流与湍流的本质区别 是否存在流体速度 u 、压强 p 的脉动性,即是否存在流体质点的脉动性。

稳定性与定态性 稳定性是指系统对外界扰动的反应。定态性是指有关运动参数随时间的变化情况。

边界层 流动流体受固体壁面阻滞而造成速度梯度的区域。

边界层分离现象 在逆压强梯度下,因外层流体的动量来不及传给边界层,而形成边界层脱体的现象。边界层脱体的条件是:①逆压强梯度;②外层流体动量来不及传入边界层。边界

层脱体的后果是：①产生大量旋涡；②造成较大的能量损失。讨论边界层脱体主要是说明流体流动局部阻力形成的原因。

雷诺数的物理意义 雷诺数是流体的惯性力与黏性力之比。

量纲分析实验研究方法的主要步骤 ①经初步实验列出影响过程的主要因素；②量纲为一化减少变量数并规划实验；③通过实验数据回归确定参数及变量适用范围，确定函数形式。

摩擦系数 层流区， λ 与 Re 成反比，而与相对粗糙度无关；一般湍流区， λ 随 Re 增加而递减，同时 λ 随相对粗糙度增大而增大；充分湍流区， λ 与 Re 无关， λ 随相对粗糙度增大而增大。

水力光滑管 当壁面凸出物低于层流内层厚度，体现不出粗糙度对阻力损失的影响时，称为水力光滑管。

完全湍流粗糙管 在 Re 很大， λ 与 Re 无关的区域，称为完全湍流粗糙管。同一根实际管子在不同的 Re 下，既可以是水力光滑管，又可以是完全湍流粗糙管。

局部阻力当量长度 把局部阻力损失看做相当于某个长度的直管，该长度即为局部阻力当量长度。

驻点压强 在驻点处，动能转化成压强（称为动压强），所以驻点压强是静压强与动压强之和。

毕托管的特点 毕托管测量的是流速，通过换算才能获得流量。

孔板流量计的特点 恒截面，变压差。结构简单，使用方便，阻力损失较大。

转子流量计的特点 恒流速，恒压差，变截面。

非牛顿流体的特性 塑性：只有当施加的剪切力大于屈服应力之后流体才开始流动。假塑性与胀塑性：随剪切率增高，表观黏度下降的为假塑性。随剪切率增高，表观黏度上升的为胀塑性。触变性与震凝性：随剪切力 τ 作用时间的延续，流体表观黏度变小，当一定的剪切力 τ 所作用的时间足够长后，黏度达到定态的平衡值，这一行为称为触变性。反之，黏度随剪切力作用时间的延长而增大的行为则称为震凝性。黏弹性：不但有黏性，而且表现出明显的弹性。具体表现如爬杆效应、挤出胀大、无管虹吸等。

管路特性方程 管路对能量的需求，管路所需压头随流量的增加而增加。

输送机械的压头或扬程 流体输送机械向单位重量流体所提供的能量(J/N)。

离心泵主要构件 叶轮和蜗壳。

离心泵的工作原理 叶轮在电机的带动下做高速旋转运动，叶片间的液体也随之转动。在离心力场的作用下，在叶轮中心形成低压；在叶轮外缘形成高压。叶轮中心吸入低势能、低动能的液体，在叶轮外缘输出高势能、高动能的液体。在蜗壳中，由于流道的逐渐扩大，液体逐渐减速，又将大部分动能转化成压强能。然后，液体以较高的压强排入出口管道。

离心泵理论压头的影响因素 离心泵的压头与流量、转速、叶片形状及直径大小有关。

叶片后弯原因 后弯叶片的叶轮边缘产生的液体动能较小，而静压能较大，动能在转化成压强能的过程中损失较小，从而泵的效率较高。

气缚现象 因泵内流体密度小而产生的压差小，无法吸上液体的现象。

离心泵特性曲线 离心泵的特性曲线指 $H_e - q_v$, $\eta - q_v$, $P_a - q_v$ 。

离心泵工作点 管路特性方程和泵的特性方程的交点。

离心泵的调节手段 调节出口阀，改变泵的转速。

汽蚀现象 液体在泵的最低压强处（叶轮入口）汽化形成气泡，又在叶轮中因压强升高而溃灭，造成液体对泵设备的冲击，引起振动和侵蚀的现象。规定泵的实际汽蚀余量必须大于允许汽蚀余量；通过计算，确定泵的实际安装高度低于允许安装高度。

必需汽蚀余量(NPSH)_r 泵入口处液体具有的动能和压强能之和必须超过饱和蒸汽压

强能多少。

离心泵的选型(类型、型号) ①根据泵的工作条件,确定泵的类型;②根据管路所需的流量、压头,确定泵的类型。

正位移特性 流量由泵决定,与管路特性无关。

往复泵的调节手段 旁路阀,改变泵的转速、冲程。

离心泵与往复泵的比较(流量、压头) 前者流量均匀,随管路特性而变,后者流量不均匀,不随管路特性而变。前者不易达到高压头,后者可达到高压头。前者流量调节用泵出口阀,无自吸作用,启动时关出口阀;后者流量调节用旁路阀,有自吸作用,启动时开足管路阀门。

通风机的全压、动风压 通风机给每立方米气体加入的能量为全压($P_a = J/m^3$),其中动能部分为动风压。

真空泵的主要性能参数 ①极限真空;②抽气速率。

► 1.1.3 重要公式

1. 气体的密度

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{pM}{RT} = \frac{M}{22.4} \frac{T_0 p}{Tp_0}$$

2. 静力学方程

$$gz_1 + \frac{p_1}{\rho} = gz_2 + \frac{p_2}{\rho}$$

$$p_2 = p_1 + \rho g(z_1 - z_2)$$

$$1 \text{ atm} = 1.013 \times 10^5 \text{ Pa} = 760 \text{ mmHg} = 10.33 \text{ mH}_2\text{O}$$

$$1 \text{ kgf/cm}^2 = 9.81 \times 10^4 \text{ Pa} = 735.6 \text{ mmHg} = 10 \text{ mH}_2\text{O}$$

静力学方程应用条件:①同种流体且不可压缩;②静止;③重力场;④单连通。

3. U形压差计

$$\Delta p = p_A - p_B = Rg(\rho_i - \rho) - \rho g(z_A - z_B) \quad (\text{两测压口不在同一高度})$$

$$\Delta p = Rg(\rho_i - \rho) \quad (\text{两测压口在同一高度})$$

式中, ρ_i 、 ρ 分别为指示液和被测液体的密度, kg/m^3 。

4. 流体的速度 u 、体积流量 q_v 、质量流量 q_m 及质量流速 G

$$q_v = uA \quad G = u\rho \quad q_m = q_v\rho = uA\rho = GA$$

5. 牛顿黏性定律

$$\tau = \mu \frac{du}{dy}$$

黏度 μ SI制单位为 $\text{Pa} \cdot \text{s}$, $1 \text{ Pa} \cdot \text{s} = 10 \text{ P} = 1000 \text{ cP}$ 。

运动黏度 $\nu = \frac{\mu}{\rho}$ SI制单位为 m^2/s 。

6. 质量守恒方程

$$\rho_1 u_1 A_1 = \rho_2 u_2 A_2 \quad (\text{定态流动})$$

$$u_1 A_1 = u_2 A_2 \quad (\text{定态流动, } \rho = \text{常数, 如液体})$$

$$u_1 d_1^2 = u_2 d_2^2 \quad (\text{定态流动, } \rho = \text{常数, 圆管内})$$

7. 机械能守恒式

均质不可压缩流体等温定态流动的柏努利方程如下:

$$gz_1 + \frac{u_1^2}{2} + \frac{p_1}{\rho} + h_e = gz_2 + \frac{u_2^2}{2} + \frac{p_2}{\rho} + h_{f,1-2} \quad (\text{J/kg})$$

$$z_1 + \frac{u_1^2}{2g} + \frac{p_1}{\rho g} + H_e = z_2 + \frac{u_2^2}{2g} + \frac{p_2}{\rho g} + H_{f,1-2} \quad (\text{m})$$

可压缩流体等温定态流动的机械能守恒式如下：

$$\frac{p_1 - p_2}{\rho_m} = \lambda \frac{l}{2d} \left(\frac{G}{\rho_m} \right)^2 + \left(\frac{G}{\rho_m} \right)^2 \ln \frac{p_1}{p_2}$$

$$\frac{p_1 - p_2}{\rho_m} = \lambda \frac{l}{2d} \left(\frac{G}{\rho_m} \right)^2 = \lambda \frac{l}{d} \frac{u_m^2}{2} \quad (\Delta p \text{ 很小或长距离运输时})$$

8. 动量守恒

$$\sum F_x = q_m (u_{2x} - u_{1x})$$

9. 雷诺数

$$Re = \frac{du\rho}{\mu} = \frac{dG}{\mu} = \frac{du}{\nu}$$

$Re \leq 2000$, 层流 $Re \geq 4000$, 湍流 $2000 < Re < 4000$, 过渡区
计算 Re 数时采用 $du\rho/\mu$ 比较多, 而对于气体, 采用 dG/μ 更为方便。

10. 阻力损失

$$h_f = \lambda \frac{l}{d} \frac{u^2}{2} \quad (\text{范宁公式})$$

$$\text{层流时 } h_f \propto \frac{u}{d^2} \propto \frac{q_V}{d^4}$$

$$\text{充分湍流时 } h_f \propto \frac{u^2}{d} \propto \frac{q_V^2}{d^5}$$

摩擦系数 λ 与雷诺数 Re 、相对粗糙度 ϵ/d 有关, 可查《化工原理》教材中的莫迪图。

11. 摩擦系数

$$\lambda = f(Re, \epsilon/d)$$

$$\text{层流 } Re \leq 2000, \lambda = \frac{64}{Re}, h_f = \frac{32\mu l u}{\rho d^2} \quad (\text{哈根-泊谟叶方程})$$

哈根-泊谟叶方程的应用条件是: ①牛顿流体; ②层流; ③圆直管速度分布稳定段。
完全湍流区(阻力平方区) $\lambda = f(\epsilon/d)$

$$\text{光滑管 } \lambda = \frac{0.3164}{Re^{0.25}}$$

12. 局部阻力

$$h'_f = \lambda \frac{l_e}{d} \frac{u^2}{2} = \zeta \frac{u^2}{2} \quad \zeta_o = 1 (\text{管出口}), \quad \zeta_i = 0.5 (\text{管入口})$$

$$\text{流道突然扩大: } \zeta = \left(1 - \frac{A_1}{A_2}\right)^2 \quad \text{流道突然缩小: } \zeta = 0.5 \left(1 - \frac{A_1}{A_2}\right)$$

13. 非圆管阻力计算

$$\text{非圆管 } h_f = \lambda \frac{l}{d_e} \frac{u^2}{2}, \quad Re = \frac{d_e u \rho}{\mu}, \quad u \text{ 为真实速度}$$

$$\text{当量直径 } d_e = \frac{4A}{\Pi} = \frac{4 \times \text{流通截面积}}{\text{润湿周边}}$$

14. 圆管内层流速度分布

$$u = u_{\max} \left[1 - \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right] \quad \text{抛物线}$$

15. 并联管路

$$q_V = q_{V1} + q_{V2} + q_{V3} + \dots$$

$$h_{f,1} = h_{f,2} = h_{f,3} = \dots$$

$$q_{V1} : q_{V2} : q_{V3} = \sqrt{\frac{d_1^5}{\lambda_1(l + \sum l_e)_1}} : \sqrt{\frac{d_2^5}{\lambda_2(l + \sum l_e)_2}} : \sqrt{\frac{d_3^5}{\lambda_3(l + \sum l_e)_3}}$$

16. 串联管路

$$q_V = q_{V1} = q_{V2} = \dots \quad h_f = h_{f,1} + h_{f,2} + \dots$$

17. 分支管路

$$q_V = q_{V1} + q_{V2} + \dots$$

$$gz_0 + \frac{p_0}{\rho} + \frac{u_0^2}{2} = gz_1 + \frac{p_1}{\rho} + \frac{u_1^2}{2} + h_{f,0-1} = gz_2 + \frac{p_2}{\rho} + \frac{u_2^2}{2} + h_{f,0-2} = \dots = \text{常数}$$

18. 毕托管(测速管)

$$u_A = \sqrt{\frac{2R(\rho_i - \rho)g}{\rho}} \quad \frac{u}{u_{\max}} = f(Re) = f(Re_{\max})$$

19. 孔板流量计(恒截面,变压差)

$$q_V = C_0 A_0 \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} = C_0 A_0 \sqrt{\frac{2R(\rho_i - \rho)g}{\rho}}$$

孔板孔流系数 $C_0 = 0.6 \sim 0.7$

文丘里流量计用 C_V 代替 C_0 , $C_V \approx 0.98$ (能耗小)

20. 转子流量计(恒压差,变截面)

$$q_V = C_R A_0 \sqrt{\frac{2V_f(\rho_f - \rho)g}{\rho A_f}}$$

21. 管路特性

$$\begin{aligned} H_e &= (z_2 - z_1) + \frac{p_2 - p_1}{\rho g} + \frac{u_2^2 - u_1^2}{2g} + \sum H_{f,1-2} \\ &= (z_2 - z_1) + \frac{p_2 - p_1}{\rho g} + \frac{u_2^2 - u_1^2}{2g} + \left(\lambda \frac{l}{d} + \sum \xi \right) \frac{u^2}{2g} \\ H_e &= \Delta z + \frac{\Delta p}{\rho g} + \sum \frac{8 \left(\lambda \frac{l}{d} + \xi \right)}{\pi^2 d^4 g} q_V^2 = A + B q_V^2 \end{aligned}$$

22. 泵的有效功率

$$P_e = \rho g H_e q_V = h_e q_m$$

23. 泵效率

$$\eta = \frac{P_e}{P_a} \times 100\%$$

24. 比例定律

$$\frac{q'_V}{q_V} = \frac{n'}{n} \quad \frac{H'_e}{H_e} = \left(\frac{n'}{n} \right)^2 \quad \frac{P'_a}{P_a} = \left(\frac{n'}{n} \right)^3$$

25. 离心泵最大允许安装高度

$$[H_g] = \frac{p_0 - p_v}{\rho g} - \sum H_{f,0-1} - [(NPSH)_r + 0.5]$$

26. 往复泵的流量

$$\text{单动泵 } q_V = \eta_V A S n_r$$

$$\text{双动泵 } q_V = \eta_V (2A - a) S n_r$$

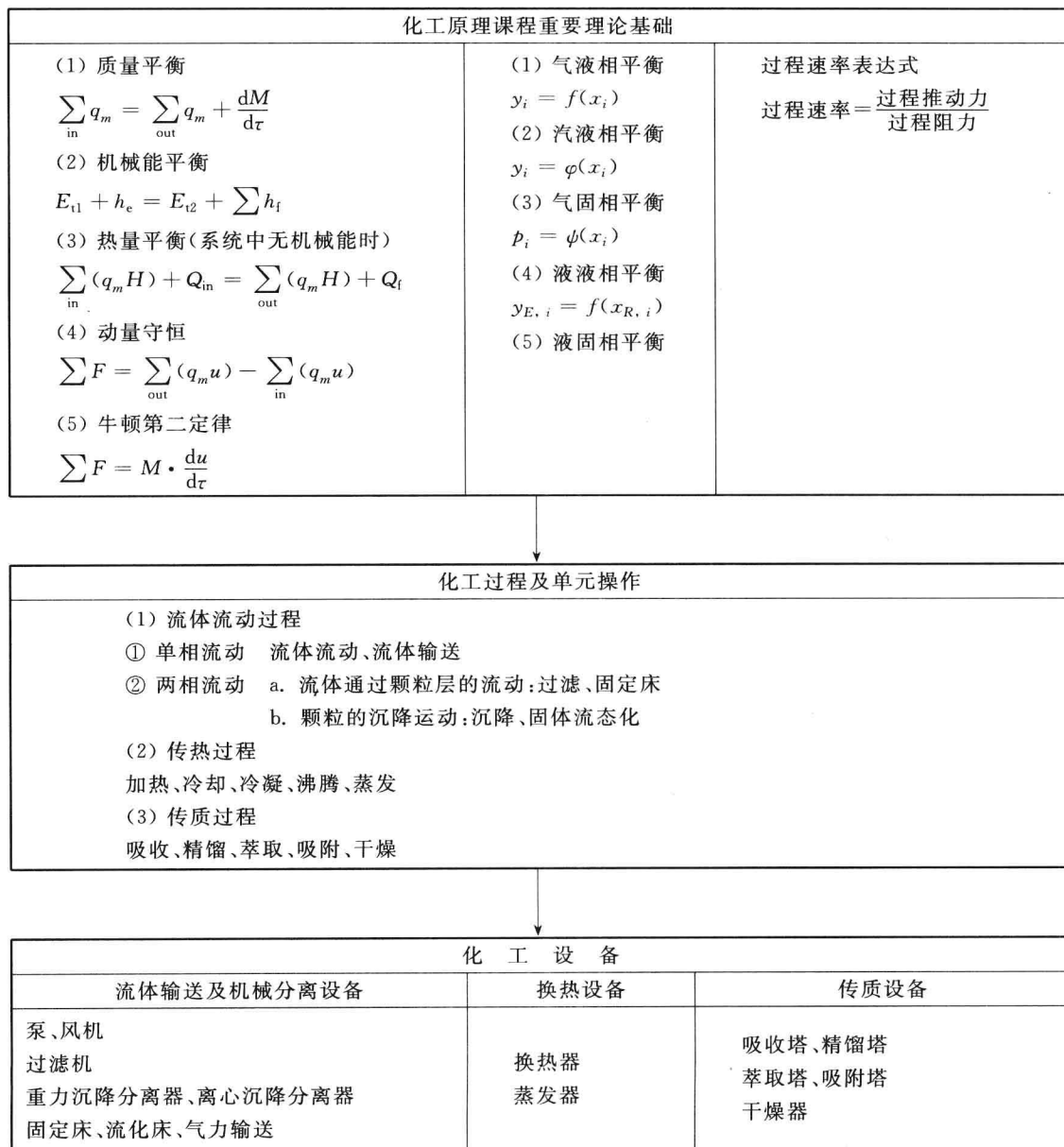
27. 风机全风压换算

$$p_T = (p_2 - p_1) + \frac{u_2^2 \rho}{2}$$

$$p'_T = p_T \frac{\rho'}{\rho}$$

1.1.4 主要内容联系图

1. 化工原理课程知识结构模块图



2. 流体流动内容结构模块图

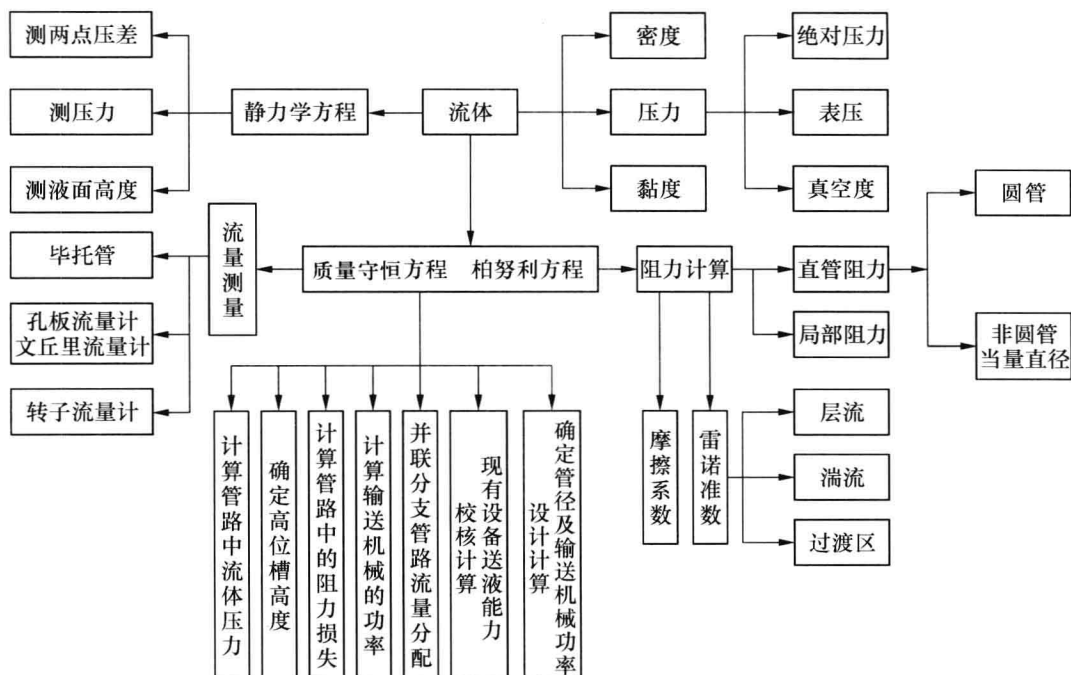


图 1-1 流体流动联系图

3. 流体输送机械内容结构模块图

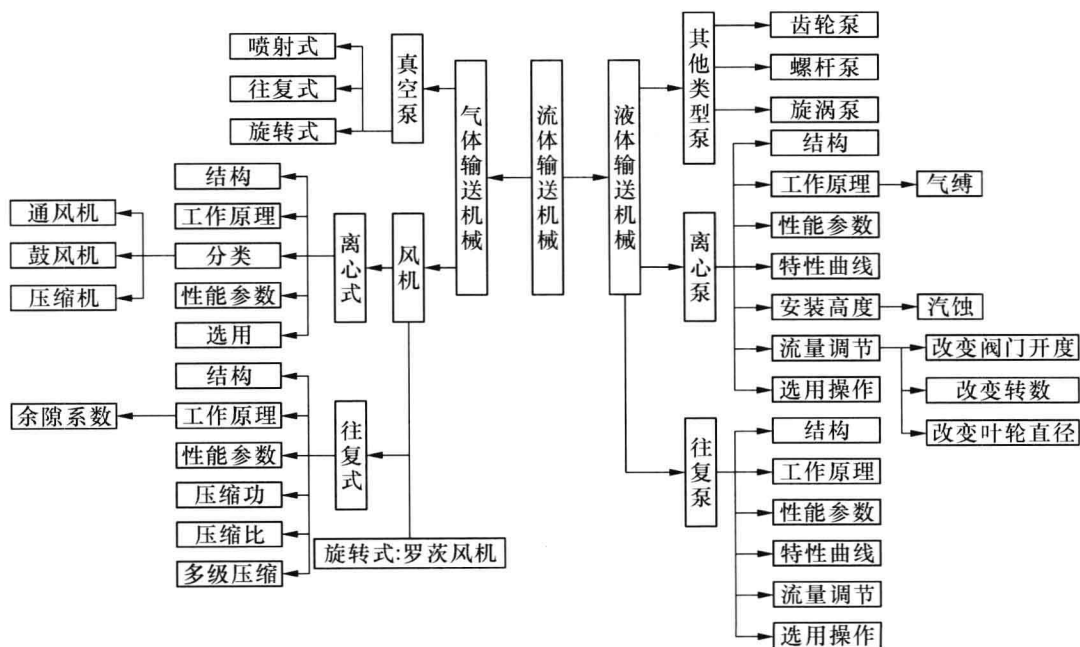


图 1-2 流体输送联系图

► 1.1.5 本章要点指导

1. 流体静力学方程式

$$gz_1 + \frac{p_1}{\rho} = gz_2 + \frac{p_2}{\rho}$$
$$p_2 = p_1 + \rho g(z_1 - z_2) = p_1 + \rho gh$$

由静力学方程可知:

(1) 静止液体内任一点压力大小与该点距液面深度有关,越深压力越大。

(2) 在静止液体内同一水平面上各点压力相等,此压力相等的面称为等压面。

(3) 液面上方压力 p_0 有变化时,必然引起液体内部各点发生同样大小的变化。

(4) $\frac{p_2 - p_1}{\rho g} = h$, 说明压力或压差大小可由液柱高度表示。

(5) $\frac{p}{\rho g} + z = \text{常数}$ 或 $\frac{p}{\rho} + gz = \text{常数}$, 说明不同截面上静压能和位能可相互转换,总和保持不变。 z 为流体距离基准面的高度,称为位压头,表示单位重量流体从基准面算起的位能, $mgz/(mg) = z$; $p/(\rho g)$ 为静压头,又称单位重量流体的静压能 $pV/(mg)$, 静压能的意义:当流体具有静压强 p 时,就能在它的作用下上升高度 $p/(\rho g)$, 这种克服重力做功的能力称为静压能。

(6) 静止的、连通的同种均质流体在同一水平面上压强相等。

(7) 静力学方程亦适用于可压缩流体, ρ 必须取平均值。

(8) 静力学方程应用的计算题,首先选等压面,计算静压强由上往下加,反之则减。

2. 机械能衡算方程式

流体流动的核心公式是流体机械能衡算方程式(柏努利方程),该公式有如下形式:

$$gz_1 + \frac{u_1^2}{2} + \frac{p_1}{\rho} + h_e = gz_2 + \frac{u_2^2}{2} + \frac{p_2}{\rho} + h_{f, 1-2} \quad h_{f, 1-2} = \left(\lambda \frac{l}{d} + \sum \zeta \right) \frac{u^2}{2} \quad (\text{a})$$

$$z_1 + \frac{u_1^2}{2g} + \frac{p_1}{\rho g} + H_e = z_2 + \frac{u_2^2}{2g} + \frac{p_2}{\rho g} + H_{f, 1-2} \quad H_{f, 1-2} = \left(\lambda \frac{l}{d} + \sum \zeta \right) \frac{u^2}{2g} \quad (\text{b})$$

应用公式应注意以下几点。

(1) 柏努利方程应用条件:定态、连续、不可压缩流体系统,在选定的两截面间,系统与周围环境无能量和质量交换,满足质量守恒方程。

(2) 公式(a)的基准为单位质量流体(1 kg),公式(b)的基准为单位重量流体(1 N)。

(3) 公式(a)的物理意义:各项均表示单位质量流体具有的能量,单位:J/kg。 gz_1 , $u_1^2/2$, p_1/ρ , gz_2 , $u_2^2/2$, p_2/ρ 分别为截面1和截面2上单位质量流体所具有的位能、动能和静压能, h_e , $h_{f, 1-2}$ 为流体在截面1→2之间获得和消耗的能量,是过程函数, h_e 为输送设备对单位质量流体所做的有效功,是选用输送设备的重要依据。

(4) 公式(b)的物理意义:各项均表示单位重量流体具有的能量,单位:J/N 或 m 液柱。 z_1 , $u_1^2/(2g)$, $p_1/(\rho g)$ 为截面1上流体所具有的位压头、动压头和静压头, z_2 , $u_2^2/(2g)$, $p_2/(\rho g)$ 为截面2上流体所具有的位压头、动压头和静压头, H_e (扬程)是输送设备对流体所提供的有效压头, $H_e = h_e/g$; $H_{f, 1-2}$ 为流体在截面1→2之间的压头损失, $H_{f, 1-2} = h_{f, 1-2}/g$ 。

(5) z , p , u 为状态函数,管内流动 u , z , p , ρ 为平均值。

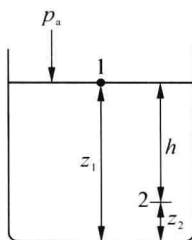


图 1-3 重力场中的静压强分布