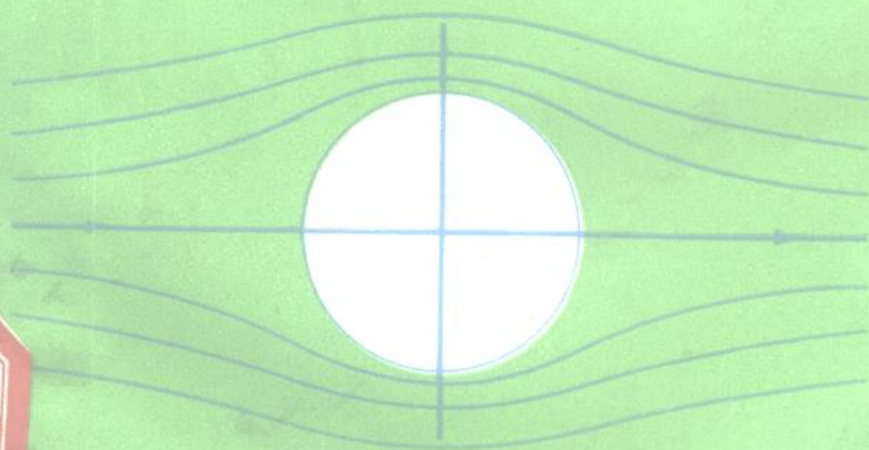


化工原理

教与学

陈常贵 主 编



天津大学出版社

化工原理教与学

陈常贵 主编

天津大学出版社

1992

DU 32/18

内容提要

本书是为高等学校化工类及相关专业编写的一本化工原理教学参考书。全书包括流体流动、流体输送设备、过滤、传热以及非牛顿流体的流动与传热五章。书末附录列出《化工原理》(上册)的教学计划和各章复习讨论题并附有参考答案。

本书可作为高等学校化工各专业师生和工程技术人员的参考书。

(津)新登字012号

化工原理教与学

陈常贵 主编

*

天津大学出版社出版

(天津大学内)

河北省永清县印刷厂印刷

新华书店天津发行所发行

*

开本: 850×1168毫米^{1/32} 印张: 7^{1/4} 字数: 188千字

1992年12月第一版 1992年12月第一次印刷

印数: 1—3000

ISBN 7-5618-0405-9

TQ·16

定价: 4.40元

前 言

本书是为高等院校化工类及相关专业编写的一本化工原理教学参考书。它既可与现有的《化工原理》教材配合使用，也可单独使用。

本书编写宗旨是依据《化工原理》各章节的特点，对书中的重点和难点进行论述。论题或大或小，既保持知识的系统性，又具有相对独立性，便于高等院校的学生和工程技术人员在学习化工原理过程中选择参考，更好地理解 and 掌握教材中的主要内容。为开拓学生的知识面，本书还编入一些化工中颇为重要的内容，如气-液两相流、非牛顿流体的流动与传热等。编写过程中力求论述清晰，文笔简练，深入浅出，理论联系实际，便于读者自学。

全书内容包括流体流动、流体输送设备、过滤、传热以及非牛顿流体流动与传热五章。书末附录列出《化工原理》（上册）的教学计划和各章的复习讨论题并附有参考答案，可供教学参考。

全书由陈常贵主编，编写人员有：第一章陈常贵、思勤，第二章李宗堂，第三章陈树章，第四章刘国维，第五章柴诚敬。

承蒋靖教授审阅书稿并提出宝贵意见，谨此致谢。

限于编者水平，书中的不妥或错误之处，敬请读者指正。

编者

目 录

第一章 流体流动	(1)
一、流体静力学及其应用.....	(2)
(一) 流体静力学方程.....	(2)
(二) 静压强的计算和测量.....	(8)
(三) 静力学基本方程的应用.....	(10)
二、质量衡算和连续性方程.....	(12)
(一) 简单的连续性方程.....	(13)
(二) 积分连续方程.....	(13)
三、机械能衡算与柏努利方程式.....	(17)
四、可压缩流体在管中的流动.....	(22)
五、动量衡算方程及其应用.....	(25)
(一) 动量衡算方程.....	(26)
(二) 动量衡算方程的应用举例.....	(27)
六、流体流动的内部结构(机理).....	(29)
七、管路计算.....	(36)
(一) 适宜流速和最佳管径.....	(36)
(二) 简单管路的计算机计算.....	(40)
八、两相流简介.....	(42)
(一) 两相流的基本参数.....	(43)
(二) 两相流的流型.....	(47)
(三) 两相流的压降计算.....	(51)
第二章 流体输送机械	(56)
一、本章教学说明.....	(56)
二、离心泵的轴向力及其平衡.....	(58)

(一) 轴向力产生的原因	(58)
(二) 轴向力的平衡	(60)
三、相似原理和比转数	(62)
(一) 相似的基本概念	(62)
(二) 离心泵的比转数	(65)
四、离心泵的气蚀余量和安装高度	(68)
(一) 有效气蚀余量	(69)
(二) 必需气蚀余量	(70)
(三) 有效气蚀余量和必需气蚀余量的关系	(72)
五、离心泵的并联和串联	(76)
(一) 离心泵的并联	(76)
(二) 离心泵的串联	(77)
六、离心通风机的特性曲线	(81)
(一) 离心通风机的一般特性曲线	(81)
(二) 离心通风机的无因次性能曲线	(86)
第三章 过滤	(91)
一、过滤基本方程式的演变	(91)
(一) 两个过滤模型	(92)
(二) 罗斯(Ruth) 方程式	(93)
(三) 柯静尼(Kozeny)-卡门(Carman)方程 式	(95)
(四) 对可压缩滤饼的修正	(96)
二、滤饼的压缩性与空隙率	(97)
三、滤饼的比阻	(99)
(一) 滤饼的压缩机理	(100)
(二) 局部比阻与平均比阻	(102)
(三) 压缩-渗透(C-P) 试验	(105)
(四) 局部比阻、空隙率的经验方程式	(108)
(五) 平均比阻计算式	(109)

四、恒压过滤与恒速过滤的比较.....	(111)
(一) 从过滤方程式比较恒压与恒速过滤.....	(111)
(二) 以实验数据比较恒压与恒速过滤.....	(112)
五、现代过滤理论简介.....	(116)
第四章 传热	(119)
一、流体对流传热的影响因素分析.....	(119)
(一) 流体的性质.....	(120)
(二) 流体的流动状况.....	(124)
(三) 强制对流与自然对流.....	(125)
(四) 传热壁面的影响.....	(128)
(五) 其它影响因素.....	(133)
二、类似律.....	(135)
(一) 热量传递与动量传递的类似.....	(137)
(二) 雷诺类似律.....	(138)
(三) 雷诺类似律的改进.....	(140)
三、管道保温层的临界厚度.....	(142)
四、温度差的讨论.....	(146)
(一) 算术平均温差与对数平均温差.....	146
(二) 逆流平均温差与并流平均温差.....	(148)
(三) 错、折流的平均温差.....	(149)
五、平均温度差法和传热单元法.....	(151)
六、列管换热器的性能估算.....	(156)
七、传热过程的强化.....	(160)
(一) 强化传热过程的途径.....	(160)
(二) 提高流速、增强流体湍动程度的措施.....	(162)
(三) 强化换热设备.....	(164)
第五章 非牛顿型流体的湍动和传热	(171)
一、流体的类型.....	(171)
(一) 流体的流变性.....	(171)

(二) 流体的主要类型和特性.....	(172)
(三) 与时间有关的非牛顿型流体.....	(176)
(四) 粘弹性流体.....	(176)
二、与时间无关的非牛顿型流体在管内流动的压强降.....	(177)
(一) 指数律流体在管内流动的压强降.....	(177)
(二) 宾汉塑性流体在管内流动的压强降.....	(185)
三、非牛顿型流体的搅拌功率.....	(189)
(一) 非牛顿型流体功率曲线的测定.....	(190)
(二) 由功率曲线计算搅拌功率.....	(193)
四、非牛顿型流体的对流传热系数.....	(195)
(一) 流体在管内强制层流的对流传热系数.....	(196)
(二) 流体在管内强制湍流的对流传热系数.....	(203)
附录.....	(209)
一、教学计划.....	(209)
二、复习讨论题.....	(212)
三、复习讨论题参考答案.....	(221)

第一章 流体流动

流体流动的基本规律是《化工原理》的重要基础，而且是读者在学习该课程时首先遇到的内容，因此一开始就注意学习方法，培养学习兴趣，对学好本门课程具有重要的作用。

流体流动之所以是本门课程的基础，其原因在于：

1.很多单元操作，例如流体输送、混合、搅拌、非均相物系的分离及两相流等，都涉及流体流动的基本规律。《化工原理》中重点讨论的流体输送，就是依据流体流动规律来进行管路设计、输送机械的选择和能量（或功率）消耗的计算等。

2.流体流动与传热、传质乃至反应过程是不可分割的，或者说化工中的传热、传质和反应过程大多是在流动条件下进行的，因此流体流动的内部特征是研究传热和传质过程的重要基础。

3.流体流动规律和传热、传质的规律有类似性，解决这些过程的方法和手段也是相类似的。

在学习本章时，除了应掌握有关的定义、基本概念和流动机理以外，重点可围绕以下几个基本方程及其应用来进行。

- 流体静力学方程；
- 质量衡算和连续性方程；
- 能量衡算和柏努利方程；
- 动量衡算和计算流动阻力的关系式。

应予指出，《化工原理》是一门实用的工程学科，读者在掌握本课程基本理论的基础上，应注意学用结合，不断积累经验，以提高分析和解决工程实际问题的能力。但那种认为《化工原理》中没有什么理论，单纯凭经验即可解决问题的想法是极其有害的，初学者尤应予以摒弃。

一、流体静力学及其应用

流体静力学研究平衡（静止）流体的力学规律及其应用。

静止流体内部由于没有相对运动，因而不显示流体的粘性。流体静力学原理不需要进行实验论证，而且完全适用于实际流体。

应予指出，流体平衡有两种情况：一种是流体对地球没有相对运动，即为重力场中的流体平衡；另一种是流体对运动着的容器无相对运动，即为流体的相对平衡。

流体的平衡（静力学）虽然比较简单，但它是流体流动的特例，而且有重要的工程应用。因此初学者熟练地掌握这部分内容是十分重要和有用的。

（一）流体静力学方程

1. 流体平衡的微分方程式

设想从静止流体中取一体积为 dV 的立方体微团，其各边边长为 dx 、 dy 、 dz ，且分别平行于坐标轴 ox 、 oy 和 oz ，如图1-1所示，作用在该微团上的力有质量力和表面力，分述如下：

（1）质量力 该力与微团的质量的大小有关，且作用在微团质量的中心。若考虑相对平衡的各种实际情况，质量力有重力、离心惯性力（以后简称离心力）等。

设微团上的单位质量力在 x 、 y 、 z 方向上的分量为 X 、 Y 、 Z ，则在 x 、 y 、 z 方向上的质量力分别为 $\rho X dx dy dz$ 、 $\rho Y dx dy dz$ 和 $\rho Z dx dy dz$ 。

（2）表面力 因流体微团不是孤立地存在的，它与相邻微团之间的接触表面上有相互作用力。这种力起源于微团内部分子的运动，其大小与表面面积有关，且为分布在流体表面上的力，故称为表面力。表面力可按其作用方向分为：一是沿表面法线方向上的压力；另一是沿表面切向的摩擦力。但对静止流体而言，由于

流体质点之间无相对运动，因此不存在摩擦力。此时表面力即为流体静压力。

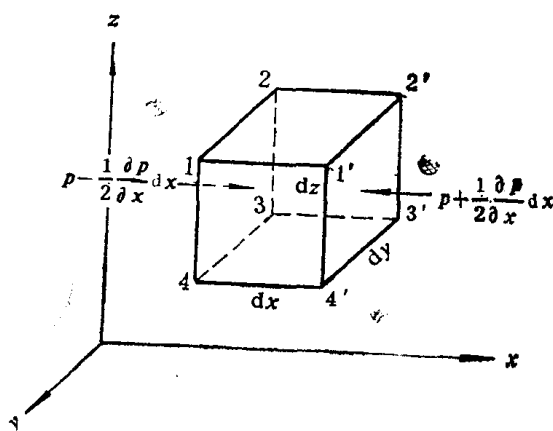


图1-1 流体微团

假设图1-1所示微团中心压强为 p ，则沿 x 方向作用于1-2-3-4面上的压强为 $p - \frac{1}{2} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} dx$ ，作用于1'-2'-3'-4'面上的压强为 $p + \frac{1}{2} \frac{\partial p}{\partial x} dx$ ，因此作用于该两表面上的压力分别为 $\left(p - \frac{1}{2} \frac{\partial p}{\partial x} dx\right)(dydz)$ 和 $\left(p + \frac{1}{2} \frac{\partial p}{\partial x}\right)(dydz)$ 。对于其它表面，可写出类似的表达式。

为使六面体微团处于静止状态，每个坐标方向上所受外力之和应等于零。对 x 方向合力为

$$\left(p - \frac{1}{2} \frac{\partial p}{\partial x} dx\right)(dydz) - \left(p + \frac{1}{2} \frac{\partial p}{\partial x} dx\right)(dydz) + \rho X dx dy dz = 0$$

化简后得

$$X - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} = 0 \quad (1-1)$$

同理对 y 方向

$$Y - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} = 0 \quad (1-1a)$$

对 z 方向

$$Z - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} = 0 \quad (1-1b)$$

式1-1为流体平衡微分方程,又称为欧拉平衡方程。

若将式1-1、1-1a和1-1b分别乘以 dx 、 dy 和 dz ,并相加可得

$$\frac{\partial p}{\partial x} dx + \frac{\partial p}{\partial y} dy + \frac{\partial p}{\partial z} dz = \rho(X dx + Y dy + Z dz)$$

即

$$dp = \rho(X dx + Y dy + Z dz) \quad (1-2)$$

式1-2为流体平衡的一般表达式。

2. 重力场下流体静力学基本方程

若流体所受的质量力仅为重力,并取 z 轴方向与重力方向相反,则

$$X = 0, \bar{Y} = 0, \bar{Z} = -g$$

将此代入式1-2,可得

$$dp = -\rho g dz \quad (1-3)$$

对不可压缩流体,密度与压强无关,可将上式积分,得

$$\frac{p}{\rho} + zg = \text{常数} \quad (1-4)$$

或

$$\frac{p_1}{\rho} + z_1 g = \frac{p_2}{\rho} + z_2 g \quad (1-4a)$$

式1-4即为重力场下流体静力学基本方程。适用于解决重力场中连续、均质、不可压缩流体的平衡问题。该式虽然简单,但在工程上有重要的实际应用。

对于可压缩流体,例如气体,此时还应考虑气体状态方程。若气体的行为符合理想气体定律,且在恒温条件下,则静力学基本方程可表示为

$$dp = -\frac{pM}{RT} g dz \quad (1-5)$$

$$\text{积分得} \quad p = p_0 e^{-(gM/RT)(z-z_0)} \quad (1-5a)$$

式中 R ——通用气体常数, $\text{kJ}/(\text{kmol} \cdot \text{K})$;

M ——气体分子量, kg/kmol ;

T ——绝对温度, K 。

在一般的工程问题中,重力场下可压缩流体的静力学方程的应用并不多见,这是因为在有限的高度上,气体的质量对压强的影响不大,一般都可忽略,仅在高空上才应考虑这种影响。

3. 离心力场下流体静力学方程

在化学工程中,除了重力场下的流体平衡外,还有一种常见的流体相对平衡问题。有时流体质点之间虽然无相对运动,但是盛有流体的容器对地球的固定坐标系有相对运动。因此若将运动坐标选定在容器设备上,则流体就成为相对平衡了。化工中应用较多的是容器作等角速度旋转运动,也就是离心力场下的平衡问题。

如图1-2所示,盛有液体的容器绕轴作旋转运动,液体被甩向外周,形成下凹的表面。液体随同容器作等角速度运动,但液体质点间无相对运动。此时作用在液体上的质量力有两种,即重力和惯性离心力,它们在 x 、 y 和 z 轴上的分量可表示为

$$\bar{X} = \omega^2 r \cos \theta = \omega^2 x \quad (1-6)$$

$$\bar{Y} = \omega^2 r \sin \theta = \omega^2 y$$

$$\bar{Z} = -g$$

式中 ω ——角速度, rad/s ;

r ——旋转半径, m 。

根据等压面微分方程式1-2,可得

$$\omega^2 x dx + \omega^2 y dy - g dz = 0 \quad (1-7)$$

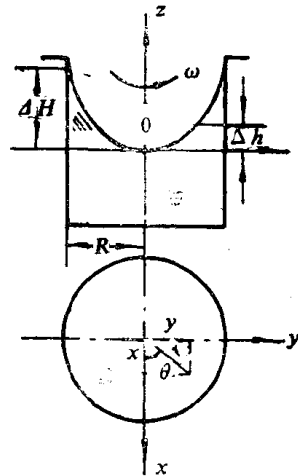


图1-2 容器作等角速度旋转运动

当 $\omega = \text{常数}$ 时, 对上式作不定积分可得

$$\frac{\omega^2 x^2}{2} + \frac{\omega^2 y^2}{2} - zg = C_0 \quad (1-8)$$

因
故

$$\frac{\omega^2}{2} r^2 - zg = C_0 \quad (1-9)$$

或

$$z = \frac{\omega^2 r^2}{2g} - C \quad (1-9a)$$

式中

$$C = C_0/g$$

当 $r = 0$ 时, 将 $z = h_0$ 代入上式可得

$$C = -h_0$$

故液体作等角速旋转运动时的自由面方程为

$$z = h_0 + \frac{\omega^2 r^2}{2g} \quad (1-10)$$

上式表明液体自由表面为一旋转抛物面。由它还可看出由于离心力的作用, 存在着超高现象。自由表面上的点比抛物面的顶点高出的垂直距离称为超高, 即

$$\Delta h = \frac{\omega^2 r^2}{2g} \quad (1-11)$$

由上式可知, 超高值与该点处的半径的平方成正比。自由表面上的最大超高值为

$$\Delta H = \frac{\omega^2 R^2}{2g} \quad (1-12)$$

式中 R —— 容器半径, m。

在 xoy 坐标平面上, 该旋转抛物体内的液体体积为

$$\begin{aligned} V &= \int_0^R \Delta h (2\pi r) dr = \int_0^R \frac{R\omega^2 r^2}{2g} (2\pi r) dr \\ &= \frac{\pi}{4g} \omega^2 R^4 = \frac{1}{2} \pi R^2 \Delta H \end{aligned} \quad (1-13)$$

离心力场下的平衡原理在离心泵或风机、旋风分离器、离心沉降和过滤等操作中有很多实际应用。可解决的主要问题有：

(1) 转速(旋转角速度)和处理量的关系,由此可获得单位质量产品所耗能量的多少;(2) 设备各点处的压强和它的变化规律,它与离心设备的结构和强度有关;(3) 处理量和操作时间的关系,它与选用离心设备的规格等有关。

离心设备中由于离心力引起的压强变化,可由下式求得

$$dp = \rho(\omega^2 x dx + \omega^2 y dy - g dz)$$

因 ω 为常数,对上式作不定积分可得

$$\begin{aligned} p &= \rho \left(\frac{\omega^2 x^2}{2} + \frac{\omega^2 y^2}{2} - zg \right) + C \\ &= \rho \left(\frac{\omega^2 r^2}{2} - zg \right) + C \end{aligned} \quad (1-14)$$

式中积分常数可由边界条件确定。

当 $r = 0$ 时, $z = z_0$, $p = p_0$, 则

$$C = p_0 + \rho g z_0 \quad (1-15)$$

故

$$p = p_0 + \rho \frac{\omega^2 r^2}{2} + \rho g(z_0 - z) \quad (1-16)$$

或

$$\begin{aligned} p &= p_0 + \rho g \left(\frac{\omega^2 r^2}{2g} + z_0 - z \right) \\ &= p_0 + \rho g z_e \end{aligned} \quad (1-16a)$$

式中 $z_e = \frac{\omega^2 r^2}{2g} + z_0 - z$

上式与前述的重力场下的静力学基本方程式完全相类似,式中的 z_e 称为当量淹没高度,其值随旋转半径及角速度而变。

液体在离心设备中的停留时间 θ ,可由离心设备中的液体体积 V (由式1-13求得)及通过该设备的体积流量 V_s 求得,即

$$\theta = \frac{V}{V_s} \quad (1-17)$$

实际操作时的允许停留时间，应根据不同工艺要求和具体条件而定，例如悬浮液进行离心沉降时，则要求悬浮液在设备中的停留时间大于颗粒的沉降时间，即

$$\theta > \theta_{\text{沉降}}$$

以上内容将在非均相分离中进一步讨论。

从以上分析可知，不管何种平衡问题，静力学方程主要研究压强的分布规律。化工生产中操作条件常用压强来表征，物料的性质也常与压强有关。因此，压强是一重要的操作参数，有关压强的计算和测量便十分重要。这也是静力学基本方程式的重要应用。

（二）静压强的计算和测量

1. 静压强的计算标准

通常将以绝对真空为起点来计算的压强称为绝对压强。绝对压强反映流体分子运动的物理本质，因此在物理、热力学上多用它作为计算标准。但是，在工程上采用的测压表是以当地大气压为计算起点的，即以大气压下的压强读数为零，因此仪表上的读数代表流体压强高于或低于当地大气压的数值，前者称为表压强，后者称为真空度。

当地大气压一般用气压计测量，其值与地区、气候条件有关，不是固定值。若需要精确地计算绝对压强，则必须测量当地的大气压值。在一般的工程计算中，多用标准大气压作为表压强或真空度的起点。标准大气压是在北纬45度的海平面上、温度为15℃时的测定值，其值等于101.325kPa。

2. 静压强的计量单位

- （1）应力单位 以Pa表示，多用于理论计算。
- （2）液柱高单位 如mmHg、mH₂O等，多用于实验室测量。
- （3）大气压单位 以标准大气压、工程大气压表示。

读者应熟记它们之间的变换。

3. 静压强的测量

流体静压强的测量仪表主要有三种类型：金属式、电测式和液柱式。金属式仪表中使待测压强与金属弹性元件的变形成比例，可测表压强或真空度，这种仪表量程较大。电测式将弹性元件的机械变形转变为电量，以便于远距离测量和控制。液柱式仪表测量精度高，但一般量程较小。液柱式压强计是以静力学基本方程为基础、利用液柱高度的变化来测量气体和液体的压强。

《化工原理》教材中介绍了单管、U管和微差压差计等液柱式测压计。在选择玻璃管直径时应注意不能过细，以避免毛细管现象对测量结果的影响，通常取5—10mm。

工程应用中，经常会遇到测量气流的微小压强或压强差，例如只有几个毫米水柱的压强，或者十几个毫米水柱的压强差，这时视差会引起测量结果对准确值的较大偏差。例如视差为1mm，若测量压差值为10mm，则误差便达10%。为了提高测量精度，利用直角三角形的斜边大于垂直边的原理，将垂直的测量管作成倾斜式的，这就是如图1-3所示的常用的倾斜式微压计。

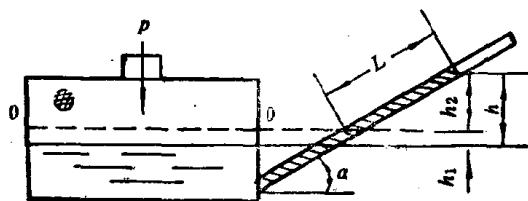


图1-3 倾斜式微压计

由图1-3可知，测压管与容器相连通，测压管配有可以调节倾角 α 的机构，容器的截面积为 A_1 ，测压管的截面积为 A_2 ，且 $A_1 \gg A_2$ ，容器中盛有密度为 ρ 的工作介质。在未测压差前，容器和斜管中的液体应在同一水平面0—0上，开始测压后，若所测流体的压强 p 为正值，则在此压强的作用下，容器内液面下降了 h_1 ，斜管内液面沿管上移了 L 。图中 h_2 表示液体上升至距原始液面0—0的垂直距离，此高度即为测压计垂直安装时液体上升