



普通高等教育“十三五”规划教材

化工基础导学

杨春梅 张四方 李 军 主编

非外借

中国石化出版社

[HTTP://WWW.SINOPEC-PRESS.COM](http://www.sinopec-press.com)

普通高等教育“十三五”规划教材

化工基础导学

杨春梅 张四方 李 军 主编



中国石化出版社

内 容 提 要

本书是与《化工基础》(第二版,张四方、刘红主编)相配套的教学用书。依照《普通高校化学类专业指导性专业规范》的要求,将教材各章中所涉及的知识点、难点和重点进行归纳与总结。编写时紧扣教材,按章给出了章节重点、知识要点、基础知识测试与答案、思考题及解答、习题详解,最后给出了模拟试题。做到了内容合理、重点突出、条理清楚、详略得当,全面体现了教学目标。

本书既可作为高等院校化学化工及相关专业学生学习的教学参考用书,也可作为从事化学化工专业工作的科技人员进行自学的指导用书。

图书在版编目(CIP)数据

化工基础导学 / 杨春梅, 张四方主编. — 北京 :
中国石化出版社, 2017. 8
普通高等教育“十三五”规划教材
ISBN 978-7-5114-4637-4

I. ①化… II. ①杨… ②张… III. ①化学工程-高等学校-教材 IV. ①TQ02

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 204672 号

未经本社书面授权,本书任何部分不得被复制、抄袭,或者以任何形式或任何方式传播。版权所有,侵权必究。

中国石化出版社出版发行

地址:北京市朝阳区吉市口路9号
邮编:100020 电话:(010)59964500
发行部电话:(010)59964526
<http://www.sinopec-press.com>
E-mail:press@sinopec.com
北京柏力行彩印有限公司印刷
全国各地新华书店经销

*

787×1092 毫米 16 开本 18.25 印张 449 千字
2017 年 10 月第 1 版 2017 年 10 月第 1 次印刷
定价:45.00 元

前 言

本书是根据张四方、刘红主编，中国石化出版社出版的《化工基础》(第二版)一书所编写的配套学习辅导用书。

本书依照《普通高校化学类专业指导性专业规范》的要求，将教材各章中所涉及的知识点、难点和重点进行归纳与总结，对教材各章中全部习题和思考题做了尽可能详细的解答，其目的是帮助学生加深对基本概念和理论的理解，养成良好的思维习惯，形成良好的知识体系，提高学生的专业素养和解决实际问题的能力，更好地掌握和运用所学知识。

本书是作者在总结多年教学经验的基础上编写而成，内容合理、重点突出、条理清楚、详略得当。内容主要包括章节重点、知识要点、基础知识测试、基础知识测试答案、思考题及解答、习题详解和模拟试题。

本书既可作为高等院校化学化工及相关专业学生学习的参考用书，也可作为从事化学化工工作的科技人员进行自学的指导用书。

本书由杨春梅、张四方、李军主编，参加编写工作的有太原师范学院张四方、杨春梅，晋中学院李军，忻州师范学院范建凤，吕梁学院薛玫。张四方、杨春梅对全书进行了审核与校对。在编写过程中，我们参阅了国内外大量的文献和资料，并在书中进行了引用，在此向所有作者表示最诚挚的感谢。在编写过程中得到了中国石化出版社的大力支持，在此也向他们表示感谢。

鉴于作者的经验 and 能力有限，书中难免存在缺点和错误，我们真诚欢迎广大读者提出批评、建议，以利我们改进。同时，向长期以来对《化工基础》教材给予厚爱的广大读者表示衷心感谢。探讨教材内容及需要教材课件的读者，请和张四方联系，邮箱：tysyyk@126.com。

目 录

第一章 流体流动与输送	(1)
§ 1.1 本章重点	(1)
§ 1.2 知识要点	(1)
§ 1.3 基础知识测试题	(16)
§ 1.4 基础知识测试题参考答案	(22)
§ 1.5 思考题及解答	(27)
§ 1.6 习题详解	(31)
第二章 传热	(46)
§ 2.1 本章重点	(46)
§ 2.2 知识要点	(46)
§ 2.3 基础知识测试题	(56)
§ 2.4 基础知识测试题参考答案	(60)
§ 2.5 思考题及解答	(66)
§ 2.6 习题详解	(69)
第三章 吸收	(83)
§ 3.1 本章重点	(83)
§ 3.2 知识要点	(83)
§ 3.3 基础知识测试题	(99)
§ 3.4 基础知识测试题参考答案	(104)
§ 3.5 思考题及解答	(113)
§ 3.6 习题详解	(115)
第四章 精馏	(130)
§ 4.1 本章重点	(130)
§ 4.2 知识要点	(130)
§ 4.3 基础知识测试题	(148)
§ 4.4 基础知识测试题参考答案	(152)
§ 4.5 思考题及解答	(158)
§ 4.6 习题详解	(163)
第五章 化学反应工程与反应器	(175)
§ 5.1 本章重点	(175)
§ 5.2 知识要点	(175)
§ 5.3 基础知识测试题	(202)
§ 5.4 测试题参考答案	(208)
§ 5.5 思考题及解答	(214)
§ 5.6 习题详解	(217)

《化工基础》试卷(一) (231)

《化工基础》试卷(二) (237)

《化工基础》试卷(三) (243)

《化工基础》试卷(四) (248)

《化工基础》试卷(五) (253)

《化工基础》试卷(六) (259)

《化工基础》试卷(七) (264)

《化工基础》试卷(八) (270)

《化工基础》试卷(九) (275)

《化工基础》试卷(十) (281)

主要参考文献 (286)

第一章 流体流动与输送

§ 1.1 本章重点

1. 流体静力学基本方程及其应用;
2. 稳态流动时的连续性方程、伯努利方程及其应用;
3. 流量测量仪表及其工作原理;
4. 实际流体流动阻力计算;
5. 离心泵工作原理、特性曲线、安装高度、工作点及流量调节。

§ 1.2 知识要点

1.2.1 流体静力学

1.2.1.1 流体的密度、相对密度和比容

(1) 密度

单位体积流体所具有的质量称流体的密度。

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1-1)$$

式中 ρ ——流体的密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$;

m ——流体的质量, kg ;

V ——流体的体积, m^3 。

流体的密度一般可在物理化学手册或有关资料中查出。流体的密度随温度和压强的变化而变化。在通常情况下, 液体的密度随压强的变化不大, 可看作不可压缩流体, 只考虑随温度的变化。而气体的密度随温度和压强变化都比较大, 是压缩性流体, 因此气体的密度在运用过程中必须标明其状态。从手册中查得的气体密度往往是某一指定条件下的数值, 操作条件下气体的密度要通过换算来得到。

一般当压强不太高, 温度不太低时, 可按理想气体来处理。常用有两种换算方法:

①根据理想气体状态方程式直接求得:

$$\rho = \frac{pM}{RT} \quad (1-2)$$

式中 p ——气体的绝对压强, Pa ;

M ——气体的摩尔质量, $\text{kg} \cdot \text{kmol}^{-1}$;

T ——气体的绝对温度, K ;

R ——气体常数, $8314\text{Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{kmol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 。

②由查出状态下密度换算为操作条件下的密度:

$$\rho = \rho_0 \cdot \frac{T_0 p}{T p_0} \quad (1-3)$$

式中 p ——气体的绝对压强, Pa ;

T ——气体的绝对温度, K ;

下标“0”——手册中指定条件下的值。

(2) 相对密度

相对密度指在指定条件下某一物质的密度相对于另一参考物质密度的比值。

$$d = \frac{\rho_1}{\rho_2} \quad (1-4)$$

式中 d ——相对密度;

ρ_1 、 ρ_2 ——不同流体的密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

(3) 比容

比容是指单位质量流体所具有的体积。

$$v = \frac{V}{m} \quad (1-5)$$

式中 v ——比容, $\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

比容与密度互成倒数关系。

$$\rho = \frac{1}{v} \quad (1-6)$$

1.2.1.2 流体的静压强

流体任一点都受到周围其它质点对它的作用。流体垂直作用于单位面积上的压力称为流体的静压强, 简称压强。

$$p = \frac{F}{A} \quad (1-7)$$

式中 p ——流体的静压强, $\text{N} \cdot \text{m}^{-2}$ 即 Pa ;

F ——作用于流体上的压力, N ;

A ——截面积, m^2 。

压强单位除国际单位制单位外, 由于习惯及工程测量方面的原因, 仍有其它单位制单位沿用。如 atm (标准大气压), $\text{kgf} \cdot \text{cm}^{-2}$ (工程大气压), mmHg , mH_2O 等, 因此还需注意单位间的换算。

压强除有不同的单位外, 还可以用不同的方法来表示:

①绝对压强: 以绝对零压为起点计算的压强, 称绝对压强, 是流体的真实压强。

②表压强: 当被测流体的绝对压强高于外界大气压时, 其压强可用此压强比外界大气压强高出的数值来表示, 称表压强。即表压强是流体的绝对压强高于外界大气压的数值。

表压强 = 绝对压强 - 大气压强

③真空度: 当被测流体的绝对压强低于大气压强时, 其压强可用此压强低于大气压强的数值来表示, 即真空度。真空度即绝对压强低于外界大气压强的数值。

真空度 = 大气压强 - 绝对压强

流体的压强可用测压仪表来测量。当被测流体的绝对压强高于外界大气压时，所用的测压仪表称压强表，压强表读出的数值是表压强。当被测流体的绝对压强低于外界大气压时，测压仪表称真空表，真空表上直接读出真空度的数值。

外界大气压随大气的温度、湿度和地区海拔高度而改变。因此，同一绝对压强在不同地区、不同条件下具有不同的数值。为了避免绝对压强、表压强、真空度三者相互混淆，表压强与真空度一般要加以标注。

1.2.1.3 流体静力学基本方程

流体静力学是研究流体在相对静止或在外力作用下达到平衡时的规律。流体处于静止时，受重力和压力的作用，重力是地心引力，可看作是不变的，起变化的只有压力。讨论流体静止时的规律，就是讨论静止流体内部压强的变化规律。描述这一规律的数学表达式称为流体静力学基本方程式。

以液体为例，推导出的静力学基本方程的几种形式：

$$\textcircled{1} \quad p = p_0 + \rho g(Z_0 - Z) \quad (1-8)$$

式中 p ——液体内部任一点的压强，Pa；

p_0 ——上方任一点的压强，Pa；

ρ ——流体的密度， $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ；

Z_0 、 Z ——上下两点距容器底的距离，m。

$$\textcircled{2} \quad Z_0 + \frac{p_0}{\rho g} = Z + \frac{p}{\rho g} \quad (1-9)$$

式中各项物理意义同式(1-8)。每一项的单位为高度单位 m。

$$\textcircled{3} \quad gZ_0 + \frac{p_0}{\rho} = gZ + \frac{p}{\rho} \quad (1-10)$$

式中各项物理意义同式(1-8)。每一项的单位为 $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

$$\textcircled{4} \quad p = p_0 + \rho gh \quad (1-11)$$

式中 p ——流体内部任一点的压强，Pa；

p_0 ——液面上方的压强，Pa；

h ——压强为 p 的点距液面的深度，m。

流体静力学方程式说明在重力作用下，静止流体内部压强的变化规律。从中可以得出如下结论：

①当容器液面上方的压强一定时，静止液体内部任一点压强的大小与液体本身的密度和该点距液面的深度 h 有关。当 p_0 相同时， h 越大， p 越大； h 相同， p 相同。因此，在静止的、连续的同一液体内部，处于同一水平面上各点的压强相等(连通器原理)。

②当液体上方压强 p_0 变化时，液体内部各点的压强发生同样的变化。

$$\textcircled{3} \quad \frac{p - p_0}{\rho g} = h, \text{ 压差可用一定高度的液体柱表示。}$$

对气体来说，气体的密度随温度、压强的变化而变化。因此，气体的密度随气体在容器内的位置高低而变化。在化工容器里这种变化可以忽略，因此以液体推导出的流体静力学基本方程式对气体也适用。

1.2.1.4 流体静力学基本方程式的应用

流体静力学基本方程主要应用于压差、压强测量。测压仪表很多，以流体静力学基本方

程式为依据的测压仪表统称为液柱压差计,其中较常用的有 U 形管压差计、微差压差计、倒 U 形管压差计。

(1) U 形管压差计

U 形管压差计由透明的 U 形玻璃管制成,在 U 形玻璃管内装有指示液。指示液要求:①与被测流体不互溶;②与被测流体不发生化学反应;③其密度大于被测流体的密度。

若把 U 形管压差计的两端接入管路的不同两处,则可测出这两处的压强差。若指示液的密度为 ρ_A ,被测流体的密度为 ρ ,由于两处压强不等,在 U 形管两侧便出现指示液面的高度差 R (R 称压差计读数),推导可得:

$$p_1 - p_2 = (\rho_A - \rho) g R \quad (1-12)$$

压强差与指示液及被测液密度有关,与指示液液面差有关。若条件 (ρ_A 和 ρ) 确定, R 的大小直接反映出压差大小。

(2) 微差压差计

微差压差计内装有两种密度相近、且不互溶的指示液,两种指示液密度分别为 ρ_A 和 ρ_C ($\rho_A > \rho_C$),指示液 C 与被测流体 B 亦不互溶,管上端有扩张的空间(扩大室),使 ΔR 变化时,指示液 ρ_C 液面变化很微小。

$$p_1 - p_2 = (\rho_A - \rho_C) g R \quad (1-13)$$

ρ_A 和 ρ_C 相差越小,测得 R 的灵敏度越高。

(3) 倒 U 形管压差计

倒 U 形管压差计可测量管路中为液体的两截面之间的压差。根据静力学基本方程,推导得:

$$p_1 - p_2 = \rho g R \quad (1-14)$$

1.2.2 流体流动的基本方程

1.2.2.1 流量与流速

(1) 流量

流体流动过程中,单位时间内流体流过管道任一横截面的流体量,称为流量。流体量可用体积和质量来计量,若用体积来计量,称为体积流量,以 V_s 表示,其单位为 $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$;若用质量来计量,则称为质量流量,以 W_s 表示,其单位为 $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

质量流量与体积流量之间的关系为:

$$W_s = V_s \cdot \rho \quad (1-15)$$

(2) 流速

流体在流动过程中,单位时间内流体质点在流动方向上所通过的距离,称为流速。以 u 表示,其单位为 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

实际上流体流经管道任一截面时各点的流速并不相同,会沿管径的变化而变化,在管截面中心处流速最大,越靠近管壁流速越小,在管壁处的流速为零。通常我们所说的流体的流速,则指整个管截面上各点的平均流速。

$$u = \frac{V_s}{A} \quad (1-16)$$

式中 u ——平均流速, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$;

V_s ——体积流量, $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$;

A ——管截面积, m^2 。

对于可压缩性的流体, 温度和压强发生变化时, 其体积流量发生变化, 流速也会发生变化。因此在讨论可压缩性流体的流量时, 必须标明其压力和温度。为应用方便, 提出质量流速的概念。所谓质量流速, 是指单位时间内流体流过单位管截面积的质量, 以 G 表示。其计算式为:

$$G = \frac{W_s}{A} = \frac{V_s \cdot \rho}{A} = u \cdot \rho \quad (1-17)$$

一般情况下, 生产中选用圆形管路, 若以 d 表示管径, 管径与流速的关系为:

$$u = \frac{V_s}{\frac{\pi}{4} \cdot d^2}, \text{ 即 } d = \sqrt{\frac{4V_s}{\pi u}}$$

1.2.2.2 稳态流动与非稳态流动

流体在流动过程中, 若任一与流体流动方向垂直的截面上流体的性质(密度、黏度)和流动参数(流速、流量、压强)等不随时间而变化, 这种流动称稳态流动。反之, 若流体的性质及流动参数随时间而变化, 这种流动则称为非稳态流动。

稳态流动中各物理量只是位置的函数, 非稳态流动中各物理量既是位置的函数, 又是时间的函数。

1.2.2.3 连续稳态流动系统的物料衡算——连续性方程

流体稳态流动过程中的连续性方程, 表明在稳态流动系统中, 管路各截面上流速的变化规律。在稳态流动系统中, 对直径不同的管段作物料衡算, 得:

$$W_s = u_1 A_1 \rho_1 = u_2 A_2 \rho_2 = \cdots = u_i A_i \rho_i = \text{常数} \quad (1-18)$$

上式为流体稳态流动过程中的连续性方程式。

若为不可压缩流体, ρ 为常数,

$$V_s = u_1 A_1 = u_2 A_2 = \cdots = u_i A_i = \text{常数} \quad (1-18a)$$

上式也为连续性方程式, 表明流体流动系统中流速随管截面的变化而变化, 流通截面越大, 流速越小。

对于圆形管路, $A = \frac{\pi}{4} d^2$

$$V_s = u_1 \cdot \frac{\pi}{4} d_1^2 = u_2 \cdot \frac{\pi}{4} d_2^2 = \cdots = u_i \cdot \frac{\pi}{4} d_i^2 = \text{常数}$$
$$u_1 d_1^2 = u_2 d_2^2 = \cdots = u_i d_i^2 = \text{常数} \quad (1-18b)$$

对于任意两截面, 有:

$$\frac{u_1}{u_2} = \frac{d_2^2}{d_1^2} \quad (1-18c)$$

1.2.2.4 连续稳态流动系统的能量衡算——伯努利方程

(1) 伯努利方程的形式

流体稳态流动时的伯努利方程式, 反映流体流动过程中能量的变化关系, 可以通过能量衡算得出。在衡算过程中, 衡算基准不同, 得出的伯努利方程的形式不同。

①以单位质量流体为基准，伯努利方程的形式为：

$$gh_1 + \frac{u_1^2}{2} + \frac{p_1}{\rho} + W_e = gh_2 + \frac{u_2^2}{2} + \frac{p_2}{\rho} + \sum h_f \quad (1-19)$$

式中 gh ——单位质量流体所具有的位能；

$\frac{u^2}{2}$ ——单位质量流体所具有的动能；

$\frac{p}{\rho}$ ——单位质量流体所具有的静压能；

W_e ——输送设备为单位质量流体所提供的有效能量；

$\sum h_f$ ——单位质量流体在流动过程中克服流动阻力而损失的能量。

上述各项能量单位为 $J \cdot kg^{-1}$ 。

②以单位重量流体为基准，伯努利方程式可以将式(1-19)各项同除以 g 得出：

$$h_1 + \frac{u_1^2}{2g} + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{W_e}{g} = h_2 + \frac{u_2^2}{2g} + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{\sum h_f}{g}$$

若令 $\frac{W_e}{g} = H_e$ ， $\frac{\sum h_f}{g} = H_f$ ，此时伯努利方程式可写为：

$$h_1 + \frac{u_1^2}{2g} + \frac{p_1}{\rho g} + H_e = h_2 + \frac{u_2^2}{2g} + \frac{p_2}{\rho g} + H_f \quad (1-19a)$$

上述各项能量单位为 m 。

③以单位体积流体为基准，伯努利方程式可以将式(1-19)各项同乘以 ρ 得出：

$$\rho gh_1 + \frac{\rho u_1^2}{2} + p_1 + \rho W_e = \rho gh_2 + \frac{\rho u_2^2}{2} + p_2 + \rho \sum h_f \quad (1-19b)$$

上述各项能量单位为 $N \cdot m^{-2}$ ，即 Pa 。

④理想流体的伯努利方程式。

当流体可按理想流体处理时，不同基准的伯努利方程形式如下：

$$gh_1 + \frac{u_1^2}{2} + \frac{p_1}{\rho} = gh_2 + \frac{u_2^2}{2} + \frac{p_2}{\rho} \quad (1-20)$$

$$h_1 + \frac{u_1^2}{2g} + \frac{p_1}{\rho g} = h_2 + \frac{u_2^2}{2g} + \frac{p_2}{\rho g} \quad (1-20a)$$

$$\rho gh_1 + \frac{\rho u_1^2}{2} + p_1 = \rho gh_2 + \frac{\rho u_2^2}{2} + p_2 \quad (1-20b)$$

理想流体的伯努利方程表明，理想流体在管道内作稳态流动而又没有外功加入时，在任一截面上单位基准流体所具有的位能、动能、静压能之和为一常数，称总机械能。常数意味着单位基准理想流体在各截面上所具有的总机械能相等，而每一种形式的能量不一定相等，即各种形式的能量之间可以相互转化。

(2)伯努利方程的应用及解题要点

运用伯努利方程式，可以确定管路中流体的流量，确定容器的相对位置，确定设备的有效功率，确定管路中流体的压强。在运用伯努利方程解题时，应注意以下几点：

①作图与确定衡算范围：根据题意画出流动系统图，并指明流体的流动方向，确定上下游截面，以明确流动系统衡算范围。

②截面的选取：两截面均应与流体流动方向垂直，并且在两截面之间的流体必须是连续的，所求的未知量应在截面上或在两截面之间，且截面上的 h 、 u 、 p 等物理量除所需求取的未知量外，都是已知的或能通过其它关系可以求取的。

③基准水平面的选取：选取基准水平面的目的是为了确定流体位能的大小，实际上在伯努利方程式中，反映的是位能差的数值，所以基准水平面可以任意选取，但必须与地面平行。伯努利方程式中的 h ，指截面中心点与基准水平面之间的垂直距离。为计算方便，通常取基准水平面通过衡算范围中两个截面中的任一截面。

④单位必须一致：统一用国际单位制。

⑤两截面上的压强用同样方法表示：伯努利方程式中静压能的计算应采用绝对压强，但由于式中反映的是压强差，所以截面上的压强可以同时用表压强表示。

1.2.3 流量测量

流体的流量是化工生产过程中的重要参数之一，为了控制生产过程稳定进行，就必须对流量进行测量并加以调节和控制。测量流量的仪表多种多样，其中根据流体力学原理而设计的测量流量和流速的仪表主要有测速管、孔板流量计和转子流量计。

1.2.3.1 测速管

测速管又称毕托(Pitot)管，它是用两根弯成直角的同心套管组成，外管的管口是封闭的，在外管前端壁面四周开有若干测压小孔。测量时，测速管可以放在管截面的任一位置上，并使其管口正对着管道中流体的流动方向，外管与内管的末端分别与液柱压差计的两臂相连。

测速管的内管测得的为管口所在位置的局部流体动能 $\frac{u_r^2}{2}$ 与静压能 $\frac{p}{\rho}$ 之和，称为冲压能，即：

$$h_A = \frac{u_r^2}{2} + \frac{p}{\rho}$$

式中 u_r ——流体在测量点处的局部流速。

测速管的外管前端壁面四周的测压孔口与管道中流体的流动方向相平行，故测得的是流体的静压能 $\frac{p}{\rho}$ ，即： $h_B = \frac{p}{\rho}$

测量点处的冲压能与静压能之差 Δh 为：

$$\Delta h = h_A - h_B = \frac{u_r^2}{2}$$

$$u_r = \sqrt{2\Delta h} \quad (1-21)$$

式中， Δh 值由液柱压差计的读数 R 来确定。 Δh 与 R 的关系式随所用的液柱压差计的形式而不同。当用普通的 U 形管压差计时， $\Delta h = \frac{(\rho_A - \rho)gR}{\rho}$ ，测速管只能测出流体在管道截面上

某一点处的局部流速。要想得到管截面上的平均流速，可将测速管口置于管道的中心线上，以测量流体的最大流速，然后利用 $\frac{u}{u_{\max}}$ 与按最大流速计算的雷诺数 $Re_{\max}$ 的关系曲线，计算管

截面上的平均流速 u_0 。

1.2.3.2 孔板流量计

孔板流量计是在管道里插入一片与管轴垂直并带有圆孔的金属板，孔的中心位于管道的中心线上，再配以 U 形管压差计来测量管路中流体的流量。孔板称为节流元件。

当管路内的流体连续稳定地流经孔板的小孔时，由于管径突然减小，流速增加，静压头相应减小，这样，在孔板前后产生压强差，利用测量压强差的方法可以度量流体流量。

在管路某一截面与孔板处列伯努利方程，并暂且忽略能量损失，得：

$$gh_1 + \frac{u_1^2}{2} + \frac{p_1}{\rho} = gh_0 + \frac{u_0^2}{2} + \frac{p_0}{\rho} \quad (1-22)$$

$h_1 = h_0$ ，简化上式并整理后得：

$$\sqrt{u_0^2 - u_1^2} = \sqrt{\frac{2(p_1 - p_0)}{\rho}} \quad (1-23)$$

由于孔板的厚度很小，所以 U 形压差计的下测压口不可能正好装在孔板上，一般把测压口分别装在孔板前后。通常采用的取压方法有两种：①角接取压法，即把上、下游两个测压口装在紧靠着孔板前后的位置上；②径接取压法，即上游测压口取在距孔板距离为 d 的位置，下游测压口取在距孔板距离为 $\frac{d}{2}$ 的位置。若用取压方法测得的压差 $(p_a - p_b)$ 代替伯努利方程式中的 $(p_1 - p_0)$ ，则有：

$$\sqrt{u_0^2 - u_1^2} = \sqrt{\frac{2(p_a - p_b)}{\rho}} \quad (1-23a)$$

由于列伯努利方程时忽略能量损失，所以引入校正系数 C_1 ，以 $(p_a - p_b)$ 代替 $(p_1 - p_0)$ ，再引入校正系数 C_2 ，则：

$$\sqrt{u_0^2 - u_1^2} = C_1 C_2 \sqrt{\frac{2(p_a - p_b)}{\rho}} \quad (1-23b)$$

以 A_1 、 A_0 分别代表管道与孔板小孔的截面积，根据连续性方程式，

$$u_1^2 = u_0^2 \left(\frac{A_0}{A_1} \right)^2$$

将其代入前面所得的式子中，整理可得：

$$u_0 = \frac{C_1 C_2}{\sqrt{1 - \left(\frac{A_0}{A_1} \right)^2}} \sqrt{\frac{2(p_a - p_b)}{\rho}} \quad (1-24)$$

令：

$$C_0 = \frac{C_1 C_2}{\sqrt{1 - \left(\frac{A_0}{A_1} \right)^2}}, \text{ 则 } u_0 = C_0 \sqrt{\frac{2(p_a - p_b)}{\rho}}$$

$$V_s = u_0 A_0 = C_0 A_0 \sqrt{\frac{2(p_a - p_b)}{\rho}} \quad (1-25)$$

$$W_s = u_0 A_0 \rho = C_0 A_0 \sqrt{2\rho(p_a - p_b)} \quad (1-25a)$$

式中 C_0 ——孔板流量计的孔流系数，由实验测定，一般在 0.6~0.7 之间。

孔板流量计安装位置的上、下游都要有一段内径不变的直管，以保证流体通过孔板之前的速度分布稳定。通常要求上游直管长度为 $50d$ ，下游直管长度为 $10d$ 。

1.2.3.3 转子流量计

转子流量计是在一根截面自下而上逐渐扩大的垂直锥形玻璃管内，装有一个能够旋转自如的由金属或其它材质制成的转子。被测流体从玻璃管底部进入，从顶部流出。当流体通过转子与玻璃管间的环隙时，通道截面缩小，流速增大，流体的静压强降低，使转子上下产生压力差。因此，转子是转子流量计的节流元件。

当流体自下而上流过垂直的锥形管时，转子受到两个力的作用，一是垂直向上的推动力，它等于流体流经转子与锥管间的环形截面所产生的压力差；另一是垂直向下的净重力，它等于转子所受的重力减去流体对转子的浮力。当流量加大使压力差大于转子的净重力时，转子就上浮；当流量减小使压力差小于转子的净重力时，转子就下沉。当压力差与转子的净重力相等时，转子处于平衡状态，即停留在一定位置上。在玻璃管外表面上刻有读数，根据转子的停留位置，即可读出流体的流量。

当转子在流体中处于平衡状态时，转子承受的压力差等于转子的净重力。

于是

$$(p_1 - p_2) A_f = V_f \rho_f g - V_f \rho g$$

所以

$$p_1 - p_2 = \frac{V_f g (\rho_f - \rho)}{A_f} \quad (1-26)$$

式中 A_f ——转子的最大截面积；

V_f ——转子的体积；

ρ_f ——转子材质的密度；

ρ ——被测流体的密度。

从上式可以看出，当用固定的转子流量计测量某流体的流量时，式中的 A_f 、 V_f 、 ρ_f 、 ρ 均为定值，所以， $p_1 - p_2$ 亦为恒定，与流量无关。

当转子停留在某固定位置时，转子与玻璃管之间的环形面积就是某固定值。此时流体流经该环形截面的流量和压强差的关系与流体通过孔板流量计小孔的情况类似，因此可仿照孔板流量计的流量公式写出转子流量计的流量公式，即：

$$V_s = C_R A_R \sqrt{\frac{2(p_a - p_b)}{\rho}} \quad (1-27)$$

将 $p_1 - p_2$ 代入，可得：

$$V_s = C_R A_R \sqrt{\frac{2g V_f (\rho_f - \rho)}{A_f \rho}} \quad (1-27a)$$

式中 A_R ——转子与玻璃管的环形截面积；

C_R ——转子流量计的流量系数，与 Re 值及转子形状有关，由实验测定。

转子流量计的刻度与被测流体的密度有关。通常流量计在出厂之前，选用水和空气分别作为标定流量计刻度的介质。当应用于测量其它流体时，需要对原有的刻度加以校正。

以上所介绍的孔板流量计与转子流量计，其测量原理都依据伯努利方程式，所不同的是孔板流量计节流口面积恒定，节流口产生的压强差随流量的变化而变化，通过压强差大小来反映流量的大小；而转子流量计在节流口处的压强差恒定，通过节流口面积的变化反映流量的大小。前者称为变压强流量计，后者称为变节流面积流量计。

1.2.4 实际流体流动与阻力计算

1.2.4.1 流体的黏度与牛顿黏性定律

流体具有流动性，一方面在外力作用下其内部发生相对运动；另一方面，在运动状态下，流体还有一种抗拒内在向前运动的特性，这一特性称为黏性。黏性是流动性的反面，是流体内部内摩擦的表现。

实验证明，流体内部的内摩擦力可用下式表示：

$$F = \mu \cdot A \cdot \frac{du}{dy} \text{ 或 } \tau = \mu \cdot \frac{du}{dy} \quad (1-28)$$

式中 F ——内摩擦力，N；

A ——内摩擦力的作用面积， m^2 ；

$\frac{du}{dy}$ ——速度梯度，即在与流动方向垂直的 y 方向上流体速度的变化率， s^{-1} ；

μ ——比例系数，其值随流体的不同而异，流体的黏性愈大，其值愈大，所以称为黏滞系数或动力黏度，简称黏度 ($Pa \cdot s$)，流体的黏度随外界条件的变化而变化，液体的黏度随温度的升高而减小，气体的黏度随温度的升高而增大；

τ ——内摩擦应力， $N \cdot m^{-2}$ 。

1.2.4.2 流体流动形态与雷诺数

流体在管内作稳态流动时，有两种截然不同的流动形态——滞流和湍流。

(1) 滞流

也叫层流，其特征为流体流动过程中，流体质点沿管轴作一层滑过一层的平行运动，层与层之间没有干扰，只有扩散转移，因而流速沿断面按抛物线分布。管中心处速度最大，管内流体的平均流速为最大流速的 0.5 倍。

(2) 湍流

也叫紊流，其特征为流体流动过程中，流体质点作不规则的杂乱运动，并相互碰撞，产生大大小小的旋涡，达到相互混合。由于流体质点的强烈分离与混合，使截面上靠管中心部分各点速度彼此拉平，速度分布比较均匀，所以速度分布曲线不再是抛物线。管内流体的平均速度为最大流速的 0.8 倍。

尽管管内流体作湍流流动，但在管壁处流体速度仍然为零，靠近管壁的流体仍作滞流流动，这一作滞流流动的流体层称为滞流内层(层流底层)。自滞流内层向管中央推移，速度逐渐增大，出现了既非滞流也非完全湍流的过渡区域，再往管中心才是湍流主体。

(3) 雷诺数

影响流体的流动型态的各种因素(流速、管径、流体的密度、流体的黏度)归结起来形成的无因次数群，通过雷诺实验总结得出，称雷诺数，用 Re 表示。

$$Re = \frac{du\rho}{\mu} \quad (1-29)$$

实验证明，流体在直管内流动时，

$Re \leq 2000$ 时，为滞流；

$Re \geq 4000$ 时，为湍流；

2000<Re<4000 时, 过渡区, 可能是滞流, 也可能是湍流, 是从滞流到湍流的过渡状态, 受外界条件的影响, 极易促成湍流的发生。

当生产中遇到非圆形截面管路时, 用当量直径 d_e 代替管径 d 计算雷诺数。

$$d_e = \frac{4 \times \text{流体流过的横截面积}}{\text{流体润湿的周边长度}} \quad (1-30)$$

1.2.4.3 流体流动时的阻力计算

流体在管路中流动时的阻力可分为直管阻力和局部阻力两种:

直管阻力——流体流经一定管径的直管时, 由于流体的内摩擦而产生的阻力。

局部阻力——流体流经管路中的管件、阀门及管截面的突然扩大或缩小等局部地方所引起的阻力。

伯努利方程式中的 $\sum h_f$ 项, 是指所研究管路系统的总能量损失, 它既包括系统中各段的直管阻力损失, 也包括系统中各局部阻力损失。

$$\sum h_f = h_f + h'_f \quad (1-31)$$

式中 h_f ——直管阻力损失;

h'_f ——局部阻力损失。

(1) 直管阻力计算

① 直管阻力计算通式

$$h_f = \lambda \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{u^2}{2} \quad (1-32)$$

上式称为范宁公式。

式中 h_f ——直管阻力, $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$;

λ ——摩擦阻力系数, 无因次;

l ——管长, m;

d ——管径, m;

u ——流体流动速度, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

② 滞流时的摩擦系数

$$\lambda = \frac{64}{Re} \quad (1-33)$$

式中 Re ——流体流动时的雷诺数。

③ 湍流时的摩擦系数: 流体呈湍流流动时, 其摩擦阻力系数 λ 与 Re 及相对粗糙度 ε/d (ε 为管壁绝对粗糙度) 有关, 即 $\lambda = f(Re, \varepsilon/d)$ 。 λ 一般由经验公式求得或由 $\lambda - (Re, \varepsilon/d)$ 关系图查得。

如用光滑管, 在 Re 为 $3 \times 10^3 \sim 1 \times 10^5$ 范围内, 实验得出的 λ 的关系式为:

$$\lambda = \frac{0.3164}{Re^{0.25}} \quad (\text{柏拉修斯公式}) \quad (1-34)$$

(2) 局部阻力计算

为克服局部阻力所引起的能量损失有两种计算方法: 局部阻力系数法和当量长度法。

① 局部阻力系数法

$$h'_f = \xi \cdot \frac{u^2}{2} \quad (1-35)$$