全国各类成人高等学校招生入学考试

教程及全真模拟试卷精解

（非师范类）

化工原理

主编　北京工业大学　王　湛　纪树兰

专升本

现代出版社

出版说明

为了帮助报考全国各类成人高等学校专科起点升本科（即专升本）招生入学考试的广大考生系统、全面地复习各门应考课程，特组织中国人民大学、北京大学、北京大学医学部（原北京医科大学）、清华大学、北京理工大学、北京工业大学、北京师范大学、北京教育学院、首都师范大学、中央财经大学、北京工商大学等10多所大学中具有丰富的专升本考试辅导经验和评阅试卷经验或参与专升本“考试大纲”制订或审订工作的教授、专家，严格按照中华人民共和国教育部制订并颁布的《全国各类成人高等学校招生复习考试大纲——专科起点升本科》编写了这套丛书。本套丛书系专升本非师范类专业课，共20本。包括：《管理学概论》、《刑法》、《会计学原理》、《电路原理》、《电子技术基础》、《医学基础》、《中医基础理论》、《市场营销学》、《财政金融学》、《化工原理》、《机械设计基础》、《结构力学》、《教育学（职）》、《政治学概论》、《新闻学概论》、《行政管理学》、《英语精读与泛读》、《文学概论》、《图书馆学》、《档案学》。

本丛书具有“新、全、真、快”四大显著特点。

新：严格按照最新专升本复习考试大纲的要求，结合作者在北京各有关大学的成教学院举办的专升本入学考试考前辅导班授课的经验和在北京地区评阅试卷经验以及对历年全国统考试题的分析、研究，掌握了专升本入学考试命题的思路、方法和原则，从而把握专升本命题的新动向。

全：在编写本丛书的过程中，既注重知识的系统性，又突出重点、难点和考点，并且节节把关，章章细审，逐项验收，力求做到不多、不重、不漏。考生通过做各章的练习题及书后的全真模拟试卷，再对照解答分析，就能发现自己的薄弱环节，及时查缺补漏，直至验收合格。

真：名家亲笔编写，而不是挂名编写，题型、题量及难易程度均与实际考试试题一致，少数练习题及全真模拟试题还略比实际考试试题难，这样，有利于考生考前熟悉考试题型，从容走进考场，答题有的放矢，思路畅通。

快：针对性强，切题率高，短期复习见效特别快。

由于本丛书具备以上四个显著特点，因此已被北京、天津、上海、石家庄、济南、武汉、南京、杭州、西安、成都、长沙、哈尔滨等众多城市中近百所大学的成人教育学院专升本入学考试辅导班作为首选教材。

相信广大考生在认真读完本书后，能很快巩固原有知识，及时查缺补漏，提高应试能力和考试水平，在专升本考试中得心应手，一举成功！！

专升本招生考试试题研究组

2000年12月于北京

目　　录

第一部分　考纲讲解

第二部分　全国各类成人高等学校专升本招生入学考试全真模拟试题及参考答案

第一部分　考纲讲解

第一章　流体流动

Ⅰ. 基本要求

本章主要内容

流体的压强及其测定、流体在流动过程中的物料衡算与能量衡算、流体在管路内流动的阻力计算、管路计算及其流量测定。

学习本章应掌握的内容

1. 不同的单位制及单位换算；
2. 流体静力学基本方程及其应用；
3. 流体流动的连续性方程及其应用；
4. 柏努利方程及其应用；
5. 流体流动时的阻力计算；
6. 能够运用流体流动的基本知识、基本原理进行一般简单管路的计算。

Ⅱ. 学习提要

第一节　概　　述

一、流体流动与连续性

流体是指具有流动性的物体，包括气体和液体。化工生产中涉及的物料大多是流体，涉及的过程大多是流体在流动状态下进行的。所以流体流动及输送成为化工过程中最普遍的单元操作之一。本章就是研究流体流动过程的基本原理及流体在管内的流动规律，并依据这些原理和规律解决流体输送过程中的计算问题。

在研究流体流动时，常把流体视为由大量质点组成、彼此间没有空隙、完全充满所占空间的连续介质。这是因为研究流体流动主要是研究流体宏观的机械运动，而不是流体质点的微观运动。这种连续性假设在处理工程问题时绝大多数情况下是适合的，但在高真空稀薄气体的情况下这种假设不再成立。

二、流体密度与比体积

单位体积的流体所具有的质量，称为流体的密度，其表达式为：

$$\rho=\frac{m}{V} \tag{1-1}$$

式中　ρ——流体的密度，kg/m^3；

m——流体的质量，kg；

V——流体的体积，m^3。

纯物质的密度一般可在物理化学手册和化学工程手册中查取。

液体可视为不可压缩流体，其密度随压力变化很小，可忽略不计。但温度对液体的密度有一定的影响，故查取液体密度时，要注明其温度条件。

气体为可压缩流体，其密度受压力和温度的影响较大。从手册中查得的气体密度通常是指一定条件下的数值。若要换算成操作条件下的数值，在压强不太高、温度不太低的情况下，一般可按理想气体处理，即：

$$\rho=\frac{pM}{RT}=\rho'\frac{T'p}{Tp'} \tag{1-2}$$

式中　p——气体的绝对压强，N/m^2；

T——气体的绝对温度，K；

M——气体的相对分子质量；

R——气体常数，其值为 8.315J/(mol·K)。

式(1-2)中的上标"′"表示手册中所指定的条件。

化工生产中经常遇到的是各种混合物。在无直接的实测数据时，混合物的密度可以用一些近似公式进行估算。需用时可查阅有关手册或教材。

单位质量的流体所具有的体积，称为比体积，用符号 υ 表示，单位为 m^3/kg，其表达式为：

$$\upsilon=\frac{V}{m} \tag{1-3}$$

比较式(1-2)和(1-3)可看出，比体积与密度互为倒数，比体积这一概念在气体方面应用较多。

三、单位制度与单位换算

化工原理涉及到各种物理量，如长度、面积、体积、密度、粘度、温度、压强等。尽管这些物理量种类很多，物理意义各不相同，但都可以通过几个彼此独立的物理量表示，这些彼此独立的物理量称为基本量，度量基本量的单位称为基本单位。基本量以外的物理量，可通过物理量之间的规律（定义或定律，如 $F=ma$）从其基本量导出，称为导出量，其单位称为导出单位。基本单位与导出单位的总和称为单位制度。

由于历史地区以及科学领域不同等原因形成了不同的单位制度。主要有两类：绝对单位制度和工程单位制度（重力单位制度），这两类单位制度又有英制与米制（公制）之分。我国政府于 1959 年正式确定米制为我国的基本计量制度。但随着科学技术与生产的发展，由于各国使用的单位制度不同给国际间的科技文化交流与贸易往来带来不便，1960 年第十一届国际计

量大会制定了一种新的单位制,称为国际单位制,简称 SI 制。SI 制由七个基本单位组成,还有四个导出单位,如表 1-1 所示。

表 1-1 国际单位制度

项目 SI 制	名称	单位	符号	名称	单位	符号	备注
基本单位	长度	米	m	热力学温度	开尔文	K	
	质量	千克	kg	光强度	坎德拉	cd	
	时间	秒	s	物质的量	摩尔	mol	
	电流强度	安培	A				
导出单位	力	牛顿	N	能量	焦尔	J	$1N=1kg\cdot m/s^2$ $1Pa=1N/m^2$ $1J=1N\cdot m$ $1W=1J/s$
	压强	帕斯卡	Pa	功率	瓦	W	

SI 制最突出的特点是:通用性强。在 SI 制中任何一个物理量只有一个单位,比如热量与功都采用同一单位,即 J(焦耳)。而在工程单位制度中,热量单位为千卡,功的单位为公斤力·米,而热量和功是本质相同的物理量,计算时必须采用换算因数使之统一,即 1 千卡 = 427 公斤力·米。这样使用起来就很不方便。

1977 年我国政府确定逐步采用国际单位制度,1984 年又頻布了《中华人民共和国法定计量单位制度》,它是以国际单位为基础,包括由我国指定的若干非国际单位在内的法定计量单位。本书采用法定计量单位制度。但作为一名工程与科技人员还必须了解各种单位制度,掌握物理量在不同单位制中的换算方法。

物理量的单位换算所遵循的依据为“量不变原则”。例如米和厘米都是度量长度的单位,若把米换算成厘米,只须乘以它们之间的换算因数,即 1 米 = 100 厘米。因为 1 米和 100 厘米是两个相等的物理量,只是度量单位不同而已。所以换算因数(即彼此相等而各有不同单位的两物理量之比)本质上等于纯数 1,任何式子乘以换算因数其值不变。这样换算起来就比较方便,且不易出错。

〔例 1-1〕 已知 $1atm=760mmHg$,将其换算为 N/m^2。

解:因为 $1mmHg=133.32N/m^2$

所以 $1atm=760mmHg\times(\frac{133.32N/m^2}{1mmHg})=1.013\times10^5N/m^2$

第二节　流体静力学

一、流体的静压强

在静止流体内，垂直作用于单位面积上的静压力，称为流体的静压强，简称压强，其表达式为：

$$p=\frac{F}{A} \tag{1-4}$$

式中　p——流体的静压强，N/m^2；

F——垂直作用于流体表面上的压力，N；

A——作用面的面积，m^2。

可以证明，流体静压强的方向垂直于流体的任一平面；作用于流体内部任一点的静压强，虽方向各不相同，但数值相等；同一水平面上各点流体的静压强都相等。

静压强的法定计量单位是 N/m^2，符号为 Pa，称为帕斯卡。但习惯上还采用其它单位：如物理大气压(atm)，工程大气压(kgf/cm^2)，某流体柱高数(mH_2O 或 mmHg)，巴(bar)等。因此，正确掌握它们之间的换算关系很重要。

$$1atm = 1.033kgf/cm^2 = 760mmHg = 10.33mH_2O$$
$$= 1.0133bar = 1.0133\times10^5Pa$$
$$1at(工程大气压) = 1kgf/cm^2 = 735.6mmHg = 10.00mH_2O$$
$$= 0.9807bar = 9.807\times10^4Pa$$

流体静压强除用不同的单位计量外，也可用不同的方法来表示，通常有以下三种表示方法：

(1)绝对压强　以绝对零压作起点计算的压强，称为绝对压强，是流体的真实压强。

(2)表压强　被测流体的绝对压强高出外界大气压强的数值，称为表压强。

(3)真空数　被测流体的绝对压强低于外界大气压强的数值，称为真空度。

绝对压强、表压强、真空度之间的关系如图 1－1 所示，也可用下面的式子表示为：

表压强＝绝对压强－大气压强

真空数＝大气压强－绝对压强

显然，设备内流体的绝对压强愈低，则它的真空度就愈高。真空度又是表压强的负值，例如，真空度为 5×10^3Pa，则表压强为 -5×10^3Pa。

应当指出，外界大气压强随大气的温度、湿度和所在地区的海拔高度而变，设备中的测压仪表都是以当时当地大气压为基准的。为避免绝对压强、表压强、真空度三者混淆，当给出一个压强数值时，必须标注是表压强还是真空数，若没有标注，则视为绝对压强。

二、流体静力学基本方程式及其应用

1．流体静力学基本方程式

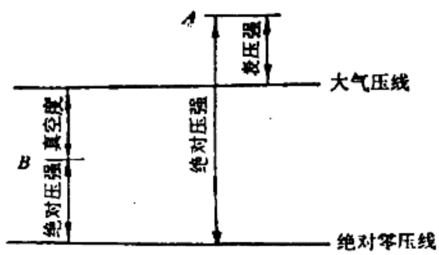

图 1-1 绝对压强、表压强和真空度的关系

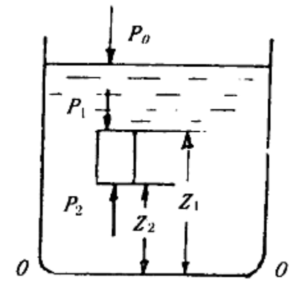

图 1-2 流体静力学基本方程式的推导

流体静力学是研究在重力场作用下，静止流体内部压强的变化规律。对于不可压缩、静止的、连续的同一种（均质）流体，描述这一规律的数学表达式称为流体静力学基本方程式，即

$$p_2 = p_1 + \rho g(Z_1 - Z_2) \tag{1-5}$$

式中 p_1、p_2——作用于液体柱上底面、下底面的压强，Pa；

ρ——流体的密度，kg/m^3；

g——重力加速度，m/s^2；

Z_1、Z_2——为液体柱上、下底面离基准水平面 0-0 的垂直距离，m。

图 1-2 为推导流体静力学基本方程式的示意图。

式(1-5)也可写成如下形式：

$$gZ_1 + \frac{p_1}{\rho} = gZ_2 + \frac{p_2}{\rho} \tag{1-6}$$

式中 gZ_1、gZ_2——表示单位质量流体所具有的位能，J/kg；

$\frac{p_1}{\rho}$、$\frac{p_2}{\rho}$——表示单位质量流体所具有的静压能，J/kg。

若将图 1-2 液柱的上底面取在容器液面上，其液面上方压强为 p_0，下底面取在距液面任意距离 h 处，其压强为 p。则有 $p_1 = p_0$、$p_2 = p$、$Z_1 - Z_2 = h$，于是式(1-5)可改写为：

$$p = p_0 + \rho g h \tag{1-7}$$

式(1-5)、(1-6)、(1-7)为流体静力学方程的不同表示形式。由式(1-7)可得到以下结论：

(1)当液面上方压强 p_0 一定时，静止流体内任一点的压强 p 与流体密度 ρ 和深度 h 有关，距液面愈深，压强愈大；

(2)当液面上方压强 p_0 发生变化时，液面下任一点压强 p 也随之发生同样大小的变化；

(3)在静止的、连续的同一种流体内，处于同一水平面上的各点压强都相等，此压强相等的水平面称为等压面；

(4)式(1-6)表明，在静止流体内部存在着两种形式的能量，即位能和静压能。对同一种流体而言，处于不同位置的流体其位能和静压能各不相同，但二者之和恒为常数，即 $gZ + \frac{p}{\rho} =$

常数。

2. 流体静力学基本方程式的应用

流体静力学基本方程式在化工中的应用很广泛，主要有以下几个方面：测量流体的压强与压强差，测量液位，计算液封高度。下面分别介绍。

(1)U形管压差计

以流体静力学基本方程式为设计依据的测压仪器一般称为液柱压差计。最典型的是U形管压差计，其结构如图1－3所示。

图1－3中U形管内的a、b两点是处于静止的、连通的同一种流体内，且在同一水平面上，因此为等压面，即 $p_a = p_b$。由静力学基本方程式可得：

$$p_a = p_1 + \rho g(m + R)$$

$$p_b = p_2 + \rho g m + \rho_0 g R$$

于是 $p_1 + \rho g(m + R) = p_2 + \rho g m + \rho_0 g R$

简化后可得到 $(p_1 - p_2)$ 与R的关系式：

$$p_1 - p_2 = (\rho_0 - \rho) g R \tag{1-8}$$

式中 $p_1 - p_2$——为流体流过圆形管道时在截面1－1和截面2－2间的压强差，Pa；

ρ_0——U形管内指示液的密度，kg/m^3；

ρ——被测流体的密度，kg/m^3；

R——U形管压差计读数，m。

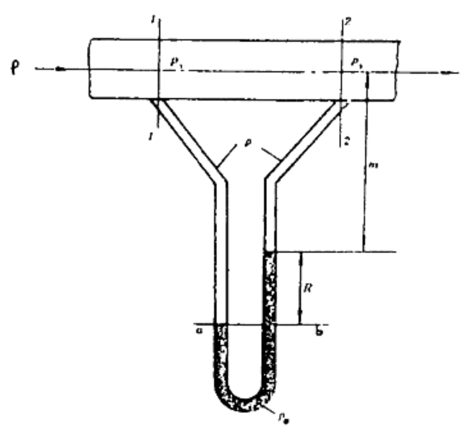

图1－3 U形管压差计

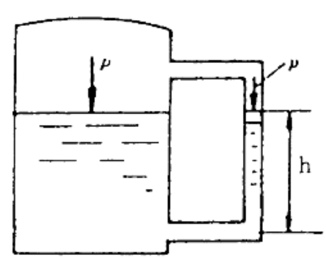

图1－4 最简单的液面计

若被测流体为气体时，其密度远小于指示液的密度，即 $\rho \ll \rho_0$。此时：

$$p_1 - p_2 \approx \rho_0 g R \tag{1-8a}$$

U形管压差计不但可以测量流体的压强差，也可测量流体在任一处的压强。若U形管的一端与被测流体相连接，另一端和大气相通，则读数R反映的是被测流体的绝对压强与大气压强之差，即表压强。

(2)液位测量

化工生产中经常要了解容器里液体物料的贮存量，或要控制容器内物料的液面，因此要进行液位的测量。测量液位的仪器叫做液位计。

最简单的液位计如图 1－4 所示。容器内装有一定量的液体，容器一侧的上、下方各开一孔，分别与容器外部的玻璃管两端相连接。显然，玻璃管内液面的高度就是容器内液面的高度，因为容器与玻璃管液面计实际上构成了一个连通器。

图 1－5 是利用压差法测量液位的装置示意图。由图可见，容器底部及容器液面上方接出的两个支管分别与装有指示液的 U 形管压差计相连接。U 形管压差计的一端装有一平衡室，并与容器液面上方的支管相通。平衡室内的液体与容器内液体相同。L 是容器内液体所允许达到的最高液面，由压差计读数 R 可以换算出容器里的液面高度(L－h)。

图 1－5 中 U 形管内 a、b 两点是处于静止的、连通的同一种流体内，且在同一水平面上，因此为等压面，即 $p_a=p_b$。根据静力学基本方程式可得：

$$p_a=p+\rho g(L-h-R)+\rho_0 gR$$

$$p_b=p+\rho gL$$

于是 $\quad p+\rho g(L-h-R)+\rho_0 gR=p+\rho gL$

简化后可得到 h 与 R 的关系为：

$$h=\frac{(\rho_0-\rho)R}{\rho} \tag{1-9}$$

当由压差计读出 R 的数值后，代入上式可计算出 h 值，而(L－h)就是容器内液面高度。显然，当 R＝0 时，h＝0，容器内的液面高度将达到允许的最大高度 L 值。

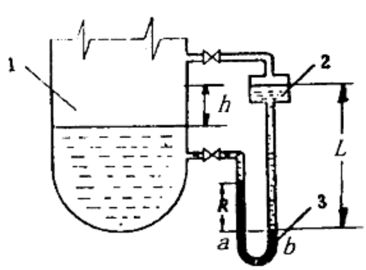

图 1－5　压差法测量液位

1－容器；2－平衡器的小室；3－U 管压差计

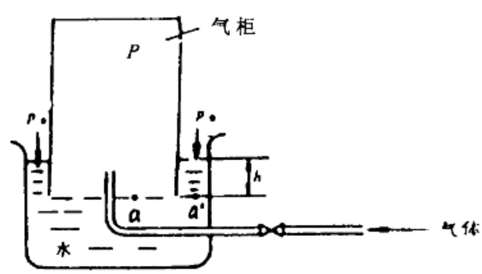

图 1－6　气柜液封

(3)液封高度的计算

在化工生产中经常遇到容器或设备的液封问题。例如化工厂中常可见到气柜，有时为了防止气柜中的气体泄漏，则可在气柜的下方充满一定的液体。如图 1－6 所示。

若已知气柜内的压强为 p，等压面为 a－a′，由静力学基本方程式得到：

$$p=p_0+\rho_{H_2O}gh$$

于是 $$h=\frac{p-p_0}{\rho_{H_2O}g} \tag{1-10}$$

h 即为气柜底部插入液面的高度。

第三节　流体流动的衡算方程

一、流量与流速

单位时间内流过管道任一截面的流体量，称为流量。流量通常有两种表示方法：若流量用体积来计量，则称为体积流量，以 V_s 表示，单位为 m^3/s。若流量用质量来计量，则称为质量流量，以 ω_s 表示，单位为 kg/s。

体积流量与质量流量的换算关系为：

$$\omega_s=V_s\cdot\rho \tag{1—11}$$

用哪种流量方便可根据处理对象而定。当处理对象为气体时，最好用质量流量，因为质量流量不随气体的压力，温度而改变。若用体积流量，当 p、T 改变时，V_s 要改变，故要进行换算。对于一定质量的气体而言，可用下式进行换算：

$$V_2=V_1\frac{p_1}{p_2}\cdot\frac{T_2}{T_1} \tag{1—12}$$

流速通常也有两种表示方法：单位时间内流体在流动方向上所流过的距离，称为平均流速，以 u 表示，单位为 m/s。单位时间内流体流过管道单位截面积的质量，称为质量流速，以 G 表示，单位为 $kg/(m^2\cdot s)$。平均流速与质量流速的定义式分别为：

$$u=\frac{V_s}{A} \tag{1—13}$$

$$G=\frac{\omega_s}{A} \tag{1—14}$$

V_s、ω_s、u、G 四者之间的关系可用下式表示：

$$G=\frac{\omega_s}{A}=\frac{V_s\cdot\rho}{A}=u\cdot\rho \tag{1—15}$$

二、稳定流动与不稳定流动

流体在管道或设备中流动时，如果在任一截面处的流速、流量、压强等有关物理量不随时间变化，而只是位置的函数，这种流动称为稳定流动。若上述物理量不仅随位置变化，而且也随时间变化，这种流动称为不稳定流动。

化工生产中，多数过程常采用连续稳定操作，故属于稳定流动。只有间歇操作过程或开车、停车阶段属不稳定过程。

三、流体流动的质量衡算

1. 连续性方程式

流体流动的连续性方程式，实质上是根据质量守恒定律得到的。

在连续稳定流动系统中，管道或设备内既无物料积累，也不发生物料泄漏现象。根据质量守恒定律，通过管道任一截面流体的质量流量应该相等，即

流入系统的质量流量＝流出系统的质量流量

对于图 1－7 所示的稳定流动的管路系统，流体流入截面 1—1 的质量流量 ω_{s1} 应等于流体流出截面 2—2 的质量流量 ω_{s2}，即

$$\omega_{s1}=\omega_{s2}$$

或 $$u_1A_1\rho_1=u_2A_2\rho_2 \qquad (1—16)$$

若上式推广到管路任一截面，即

$$u_1A_1\rho_1=u_2A_2\rho_2=\cdots\cdots=uA\rho=\text{常数} \qquad (1—16a)$$

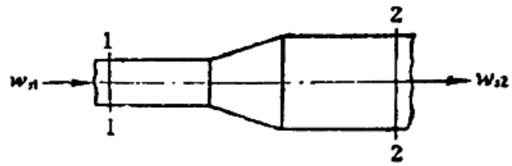

图 1－7 推导连续性方程式的示意图

对于不可压缩流体，ρ 为一常数，式(1—16a)可写为：

$$V_s=u_1A_1=u_2A_2=\cdots\cdots=uA=\text{常数} \qquad (1—16b)$$

上式表明不可压缩流体不仅流过各截面的质量相等，而且体积流量也相等。

式(1—16)、(1—16a)、(1—16b)都称为流体在管内作稳定流动时的连续性方程式。该方程揭示了在稳定流动系统中，当流量一定时，不等径的串联管路各截面上流速的变化规律。

对于圆形管道，不可压缩流体作稳定流动时的连续性方程可写为：

$$u_1\frac{\pi}{4}d_1^2=u_2\frac{\pi}{4}d_2^2$$

由此得到 $$\frac{u_2}{u_1}=(\frac{d_1}{d_2})^2 \qquad (1—17)$$

该式表明流体流过不同直径的圆形管道时，其流速与管道直径的平方成反比。

2．连续性方程式的应用

连续性方程式是流体流动章一个重要的计算公式，它只适用于作稳定流动的系统。对于不稳定流动的系统，由于流量随时间而发生变化，连续性方程即不适用。应用连续性方程式，可以确定输送管路的直径或流体在管中的流速，即已知式(1—17)中的任意三项，便可确定第四项。

〔例 1—2〕 某水站用一台水泵抽水，已知吸水管为 Φ108×4mm，管中流速为 1.5m/s，压出管为 Φ76×2.5mm。求压出管中水的流速。

解：已知 $d_1=108-2\times4=100$mm　　$u_1=1.5$m/s　　$d_2=76-2\times2.5=71$mm

由式(1—17)得：

$$u_2=u_1(\frac{d_1}{d_2})^2=1.5(\frac{100}{71})^2=3\text{m/s}$$

〔例 1—3〕 在稳定流动系统中，图 1－7 中的水连续地由细管流到粗管。已知粗管内径为细管的 2 倍，即 $d_2=2d_1$。求细管内的流速为粗管的几倍？

解：因为 $d_2=2d_1$

所以 $$u_1=u_2(\frac{d_2}{d_1})^2=u_2(\frac{2d_1}{d_1})^2=4u_2$$

即细管内水的流速为粗管的 4 倍。

由此可见，当体积流量一定时，流速与管径的平方成反比。这种关系虽然简单，但对分析流体流动问题是很有用的。

四、流体流动的能量衡算

对于流体流动系统，除了掌握系统的质量衡算外，还必须掌握流体在流动过程中各种形式能量之间的转换关系，即柏努利方程式。这里采用能量衡算的方法推导柏努利方程式。

1. 柏努利方程式

对于图 1－8 所示的稳态流动系统，且流体为不可压缩的。若截面 1—1 和截面 2—2 为衡算范围，根据能量守恒定律，1kg 流体进入截面 1—1 所具有的能量加上泵所提供的外加能量应等于流体离开截面 2—2 时所具有的能量加上流体流过两截面间的能量损失，即

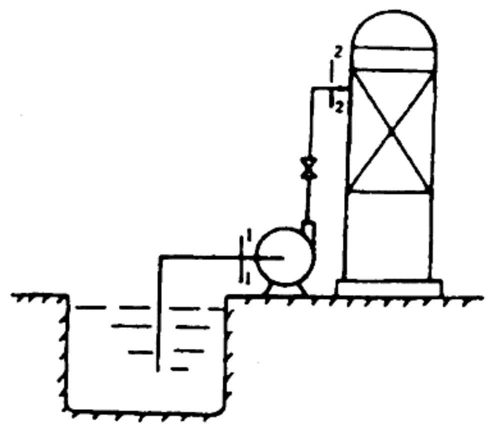

图 1－8　实际流体流动时能量衡算

$$gZ_1+\frac{u_1^2}{2}+\frac{p_1}{\rho}+W_e=gZ_2+\frac{u_2^2}{2}+\frac{p_2}{\rho}+\Sigma h_f \qquad (1—18)$$

式中　gZ_1、gZ_2——分别为截面 1—1、2—2 处流体所具有的位能，J/kg；

$\frac{u_1^2}{2}$、$\frac{u_2^2}{2}$——分别为截面 1—1、2—2 处流体所具有的动能，J/kg；

$\frac{p_1}{\rho}$、$\frac{p_2}{\rho}$——分别为截面 1—1、2—2 处流体所具有的静压能，J/kg；

W_e——单位质量流体从输送机械所获得的外加能量，称为外加功，J/kg；

Σh_f——单位质量流体在两截面间所消耗的能量，称为能量损失，J/kg。

式(1—18)称为流体稳定流动时的能量衡算方程式，即柏努利方程式。

若假设流体没有粘性，因而流动时不产生流动阻力，则 $\Sigma h_f=0$，这种流体称为理想流体。对于理想流体，又没有外功加入，即 $\Sigma h_f=0$，$W_e=0$。式(1—18)可简化为：

$$gZ_1+\frac{1}{2}u_1^2+p_1/\rho=gZ_2+\frac{1}{2}u_2^2+p_2/\rho \qquad (1—19)$$

式(1—19)称为理想流体的柏努利方程式。

2. 柏努利方程式的讨论

(1)式(1—18)中的各项单位均为 J/kg，它的物理意义为单位质量的流体所具有的能量。但应注意 gZ、$\frac{u^2}{2}$、$\frac{p}{\rho}$ 与 W_e、Σh_f 的区别。前三项是指在某截面上流体本身所具有的位能、动能、静压能，而后两项是指流体在两截面间所获得和所消耗的能量。

式中的 W_e 称为外加功(也称有效功)。若被输送流体的质量流量为 ω_s,则单位时间内输送机械对流体所作的有效功称为有效功率,其单位为 J/s 或 W,用符号 N_e 表示,即

$$N_e = W_e \cdot \omega_s = W_e \cdot V_s \cdot \rho \tag{1—20}$$

若考虑输送机械的效率 η,则实际消耗的功率称为轴功率,单位也为 J/s 或 W,用符号 N 表示,即

$$N = \frac{N_e}{\eta} = \frac{W_e \cdot \omega_s}{\eta} \tag{1—21}$$

(2)式(1—19)表明,对理想流体,在稳态流动、且无外功加入时,任一截面上的总机械能是守恒的,即任一截面上的位能、动能、静压能之和为一常数,但各种能量之间可以相互转换。例如理想流体在不等径的水平管道中作稳定流动时,当流动截面变小时,流速增加,静压能变小,说明一部分静压能转变为动能,但二者之和为一常数。

(3)如果流体处于静止状态,即 $u_1 = u_2 = 0$。因为流体不流动,所以没有阻力,即 $\Sigma h_f = 0$,当然也不需要外加功,即 $W_e = 0$,此时式(1—18)变成:

$$gZ_1 + \frac{p_1}{\rho} = gZ_2 + \frac{p_2}{\rho}$$

这就是流体静力学基本方程式,显然它是柏努利方程式的一个特例。

(4)对于可压缩流体,当所取系统两截面间的绝对压强变化小于原来压强的 20%时,即 $\frac{p_1 - p_2}{p_1} < 20\%$,仍可用式(1—18)计算。但式中流体的密度应用平均密度 $\rho_m = \frac{\rho_1 + \rho_2}{2}$代替。这种处理方法所导致的误差,在工程计算中是允许的。

(5)式(1—18)是以单位质量流体为衡算基准得到的柏努利方程式。若流体的衡算基准不同,则可得到不同形式的柏努利方程式,不同形式用于不同场合。

①若以单位重量流体为衡算基准,式(1—18)各项除以 g,则得:

$$Z_1 + \frac{u_1^2}{2g} + \frac{p_1}{\rho g} + H_e = Z_2 + \frac{u_2^2}{2g} + \frac{p_2}{\rho g} + H_f \tag{1—18a}$$

上式的各项单位均为 m 或$\frac{J}{N}$,它的物理意义为单位重量的流体所具有的能量。通常把 Z、$\frac{u^2}{2g}$、$\frac{p}{\rho g}$分别称为位压头、动压头和静压头。而把 $H_e = \frac{W_e}{g}$称为输送机械对流体所提供的有效压头,$H_f = \frac{\Sigma h_f}{g}$称为压头损失。

②若以单位体积流体为衡算基准,式(1—18)各项乘以 ρ,则得:

$$gZ_1 \cdot \rho + \frac{u_1^2}{2} \cdot \rho + p_1 + W_e \cdot \rho = gZ_2 \cdot \rho + \frac{u_2^2}{2} \cdot \rho + p_2 + \Sigma h_f \cdot \rho \tag{1—18b}$$

上式各项单位均为 N/m^2 或 Jm^3,它的物理意义为单位体积的流体所具有的能量。

采用不同衡算基准得到的柏努利方程式(1—18a)和(1—18b),在流体输送机械章的计算中很重要。

3. 柏努利方程式的应用

柏努利方程式是流体流动章非常重要的基本方程式,用它可以解决流体输送过程中的很

多实际问题。例如，可以确定流体在输送管道中的流量或流速；确定各容器间的相对位置以及确定输送机械的功率等。现举例说明如下。

(1)确定管道中流体的流量或流速

〔例 1—4〕 如附图所示。高位槽内的水面高于地面 8m，水从 $\Phi108\times4$mm 的管道中流出，管路出口高于地面 2m。在操作条件下水流经系统的能量损失可按 $\Sigma h_f=6.5u^2$ 计算，其中 u 为水在管内的流速，m/s。试计算：

(1)A—A′截面处水的流速；　(2)水的流量，以 m^3/h 计。

解：取高位槽液面为截面 1—1，水管出口为截面 2—2，取地平面为基准水平面。在 1—1 和 2—2 两截面间列柏努利方程式：

$$gZ_1+\frac{u_1^2}{2}+\frac{p_1}{\rho}+W_e=gZ_2+\frac{u_2^2}{2}+\frac{p_2}{\rho}+\Sigma h_f$$

因无外加功，故 $W_e=0$；因两截面处的压强均为大气压，故 $p_1=p_2=0$(表压)；又因高位槽截面远远大于管路截面，故 $u_1\ll u_2$，可认为 $u_1\approx0$；相对基准水平面而言，$Z_1=8$m，$Z_2=2$m。则上式可简化为：

$$gZ_1=gZ_2+\frac{u_2^2}{2}+\Sigma h_f \quad 或 \quad \frac{u_2^2}{2}+\Sigma h_f=g(Z_2-Z_1)$$

将已知数据代入得：

$$\frac{u_2^2}{2}+6.5u^2=9.81(8-2)$$

$$u_2=\sqrt{\frac{9.81\times6}{7}}=2.9\text{m/s} \quad (注意这里\ u_2=u)$$

所以 A—A′截面处水的流速的 2.9m/s。

则水的体积流量为：

$$V=u_2\cdot A_2=u_2\cdot\frac{\pi}{4}d^2 \quad (已知\ d=108-4\times2=100\text{mm})$$

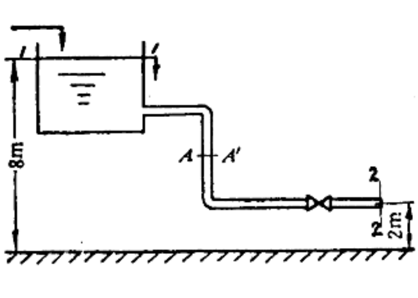

图 1-9　例 1—4 附图

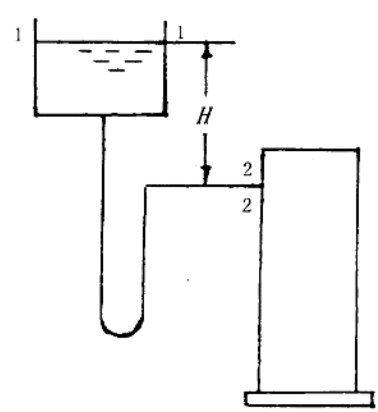

图 1-10　例 1—5 附图

$=2.9\times0.785\times0.1^2\approx2.28\times10^{-2}m^3/s=82.1m^3/h$

(2)确定容器间的相对位置

〔例 1—5〕 如附图所示。将密度为 $900kg/m^3$ 的液体从一恒定的高位槽通过管道输送到精馏塔内。管道为 $\Phi89\times3.5mm$，塔内压强为 40×10^3Pa(表压)。如果要求流量为 $50m^3/h$，从高位槽液面到管道出口的能量损失为 20J/kg。试求高位槽液面到塔进料口间的距离 H 为多少米?

解:取高位槽液面为截面 1—1，管子出口处为截面 2—2，并以截面 2—2 的中心线为基准水平面。在两截面间列柏努利方程式，即

$$gZ_1+\frac{u_1^2}{2}+\frac{p_1}{\rho}+W_e=gZ_2+\frac{u_2^2}{2}+\frac{p_2}{\rho}+\Sigma h_f$$

因为高位槽液面上方为大气压，故 $p_1=0$(表压);高位槽截面远远大于输送管路截面，可认为 $u_1\approx0$;系统无外加功，$W_e=0$;因选 2—2 截面为基准水平面，故 $Z_2=0$;u_2 可通过流量求出:

$$u_2=\frac{V_s}{A}=\frac{V_s}{\frac{\pi}{4}d^2}=\frac{50/3600}{0.785\times0.082^2}=2.64m/s$$

将已知数据代入柏努利方程式，并整理得:

$$Z_1=(\frac{2.64^2}{2}+\frac{40\times10^3}{900}+20)/9.81=6.92m$$

即 $H=Z_1=6.92m$

(3)确定输送机械的功率

〔例 1—6〕 如附图所示。某化工厂用泵将贮槽内的碱液输送至吸收塔顶，经喷嘴喷出。泵的进口管为 $\Phi108\times4.5mm$ 的钢管，碱液在进口管中的流速为 1.5m/s，出口管为 $\varnothing76\times2.5mm$ 的钢管。贮槽液面到塔顶喷嘴上方进料口处的垂直距离为 18.5m，碱液经管道系统的能量损失为 30J/kg，塔顶进料口处的压强为 29.4×10^3Pa(表压)，碱液的密度为 $1100kg/m^3$。设泵的效率为 65%，试求泵所需的轴功率。

解:取贮槽液面 1—1 为基准水平面，塔顶进料口处为截面 2—2，在两截面间列柏努利方程式:

$$gZ_1+\frac{u_1^2}{2}+\frac{p_1}{\rho}+W_e=gZ_2+\frac{u_2^2}{2}+\frac{p_2}{\rho}+\Sigma h_f$$

则 $$W_e=(Z_2-Z_1)g+\frac{p_2-p_1}{\rho}+\frac{u_2^2-u_1^2}{2}+\Sigma h_f$$

已知 $Z_1=0$ $Z_2=18.5m$ $p_1=0$(表压) $p_2=29.4\times10^3Pa$(表压)

因贮槽液面较管道截面大得多，故 $u_1\approx0$。碱液在进口管中的流速 $u=1.5m/s$，在出口管中的流速 u_2 可由连续性方程求出:

因为:进口管内径 $d=108-4.5\times2=99mm$，出口管内径 $d_2=76-2.5\times2=71mm$

则 $$u_2=u(\frac{d}{d_2})^2=1.5(\frac{99}{71})^2=2.92m/s$$