

高等学校教材

化工原理学习指导

叶启亮 主编

高等教育出版社

高等学校教材

化工原理学习指导

Huagong Yuanli Xuexi Zhidao

	叶启亮	主 编
熊丹柳	刘玉兰	副主编
	齐鸣斋	主 审

高等教育出版社·北京

内容提要

本书是与齐鸣斋等编写的教材《化工原理》(上、下册)相配套的学习指导用书。旨在帮助学生掌握“化工原理”课程的学习方法,加深对基本概念、基本理论、重点公式的理解,提高分析解决实际工程问题的能力。

本书首先列出《化工原理》中各章节的基础概念、重点公式,接着通过典型例题讲解帮助读者深入理解领会,然后选取各章中最基本的内容、最易混淆的概念以思考题方式、提问解答形式拓展学生的思维。最后读者可以通过自测题自我检查学习效果。

本书可作为高等院校化工类相关专业的本专科学生学习或研究生入学考试的参考书,同时可供高等院校化工原理授课教师参考,还可以作为从事化工工作人员的自学指导书。

图书在版编目(CIP)数据

化工原理学习指导/叶启亮主编. --北京:高等教育出版社,2016.2

ISBN 978-7-04-044471-1

I. ①化… II. ①叶… 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(2015)第 308743 号

策划编辑 刘 佳
插图绘制 杜晓丹

责任编辑 刘 佳
责任校对 刘娟娟

封面设计 杨立新
责任印制 毛斯璐

版式设计 马敬茹

出版发行 高等教育出版社
社 址 北京市西城区德外大街 4 号
邮政编码 100120
印 刷 北京玥实印刷有限公司

开 本 787mm×1092mm 1/16
印 张 16.5
字 数 400 千字
购书热线 010-58581118

咨询电话 400-810-0598
网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>
网上订购 <http://www.hepmall.com.cn>
<http://www.hepmall.com>
<http://www.hepmall.cn>
版 次 2016年2月第1版
印 次 2016年2月第1次印刷
定 价 24.40 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换
版权所有 侵权必究
物 料 号 44471-00

前 言

化工原理是综合运用数学、物理学和化学等基础知识分析和解决实际化工生产过程中各单元操作问题的工程学科。该门课程涉及的概念多、公式多、变量多、计算繁琐,为帮助学生学好该门课程,编写了这本《化工原理学习指导》。本书是与齐鸣斋等编写的教材《化工原理》(上、下册)相配套的学习指导书。

全书共 12 章,包括流体流动、流体输送机械、流体通过颗粒层的流动、颗粒的沉降和流态化、传热、蒸发、气体吸收、液体精馏、气液传质设备、液液萃取、其他传质分离方法和固体干燥,与《化工原理》(上、下册)章节对应。每章主要分以下五部分内容:

基本概念:列出各章的主要概念,并作简要解释。

重点公式:列出各章的主要常用公式及应用条件。

典型例题:根据各章节内容,选取本章典型例题加以分析解答,帮助学生理解掌握基本知识,提高分析与解决问题的能力。

思考题:选取各章中最基本的内容、最易混淆的概念以提问解答的形式拓展学生的思维。

自测题:主要有填空题、选择题和计算题,并在附录中列出全部参考答案。本部分以供学生自我检查学习效果使用,以激发学生学习兴趣,提高学习质量。

本书由华东理工大学化工原理教研组教师编写。第 1 章、第 2 章、第 4 章、第 6 章由叶启亮编写,第 7 章、第 8 章、第 9 章、第 10 章由熊丹柳编写,第 3 章、第 5 章、第 11 章、第 12 章由刘玉兰编写。

全书由齐鸣斋教授审阅。在本书的编写过程中得到教研组老师的大力帮助,同时也吸取了众多兄弟院校的宝贵经验,在此表示衷心的感谢。

由于编者学识有限,本书难免有疏漏和不足之处,恳请读者批评指正。

编者

2015 年 7 月于华东理工大学

目 录

第 1 章 流体流动	1	第 4 节 思考题简答	94
第 1 节 基本概念	1	第 5 节 自测练习题	95
第 2 节 重点公式	4	本章符号说明	97
第 3 节 典型例题	5	第 6 章 蒸发	99
第 4 节 思考题简答	18	第 1 节 基本概念	99
第 5 节 自测练习题	20	第 2 节 重点公式	101
本章符号说明	30	第 3 节 典型例题	102
第 2 章 流体输送机械	33	第 4 节 思考题简答	106
第 1 节 基本概念	33	第 5 节 自测练习题	106
第 2 节 重点公式	35	本章符号说明	109
第 3 节 典型例题	36	第 7 章 气体吸收	111
第 4 节 思考题简答	44	第 1 节 基本概念	111
第 5 节 自测练习题	46	第 2 节 重点公式	117
本章符号说明	52	第 3 节 典型例题	120
第 3 章 流体通过颗粒层的流动	54	第 4 节 思考题简答	126
第 1 节 基本概念	54	第 5 节 自测练习题	129
第 2 节 重点公式	56	本章符号说明	132
第 3 节 典型例题	57	第 8 章 液体精馏	134
第 4 节 思考题简答	62	第 1 节 基本概念	134
第 5 节 自测练习题	63	第 2 节 重点公式	139
本章符号说明	65	第 3 节 典型例题	140
第 4 章 颗粒的沉降和流态化	67	第 4 节 思考题简答	148
第 1 节 基本概念	67	第 5 节 自测练习题	149
第 2 节 重点公式	70	本章符号说明	154
第 3 节 典型例题	70	第 9 章 气液传质设备	156
第 4 节 思考题简答	76	第 1 节 基本概念	156
第 5 节 自测练习题	77	第 2 节 重点公式	162
本章符号说明	79	第 3 节 典型例题	162
第 5 章 传热	81	第 4 节 思考题简答	165
第 1 节 基本概念	81	第 5 节 自测练习题	166
第 2 节 重点公式	83	本章符号说明	167
第 3 节 典型例题	86	第 10 章 液液萃取	171

第1节 基本概念	171	第5节 自测练习题	189
第2节 重点公式	173	本章符号说明	190
第3节 典型例题	174	第12章 固体干燥	192
第4节 思考题简答	179	第1节 基本概念	192
第5节 自测练习题	180	第2节 重点公式	194
本章符号说明	182	第3节 典型例题	195
第11章 其他传质分离方法	184	第4节 思考题简答	203
第1节 基本概念	184	第5节 自测练习题	204
第2节 重点公式	186	本章符号说明	206
第3节 典型例题	186	附录 自测题答案	208
第4节 思考题简答	187	参考文献	257

流 体 流 动

第 1 节 基 本 概 念

1. 流体基本概念及连续性假定

(1) 流体:气体和液体统称为流体。一般来说,液体可视为不可压缩流体,气体可视为可压缩流体。

(2) 可压缩流体与不可压缩流体的区别:密度不随压强变化的流体称为不可压缩流体;密度随压强变化的流体称为可压缩流体。

(3) 连续性假定: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。

(4) 质点:含有大量分子的流体微团,其尺寸远小于设备尺寸,但比分子自由程大得多。

2. 流体运动的考察方法

(1) 拉格朗日法:选定流体质点,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。

(2) 欧拉法:在固定空间位置上观察流体质点的运动情况,如空间各点速度、压强等,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。

(3) 轨线与流线:轨线是某一流体质点的运动轨迹,是采用拉格朗日法考察流体运动所得的结果。流线上各点的切线表示某一时刻各点的速度方向,是欧拉法考察的结果。

(4) 控制体:当划定一固定的空间体积来考察问题,该空间体积称为控制体。

3. 牛顿黏性定律及流体黏度

(1) 牛顿黏性定律:

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

(2) 牛顿黏性定律的物理意义:剪应力与法向速度梯度成正比,与法向压力无关。

(3) 黏性的物理本质:分子间的引力和分子的运动与碰撞。

(4) 理想流体与实际流体的区别:黏度是零的流体称为理想流体,实际流体都有黏度,一般

都不为零。

4. 流体流动的定态性与稳定性

(1) 定态流动: 流体运动空间各点的状态不随时间而变化, 则该流动被称为定态流动, 定态性指的是有关运动参数随时间的变化情况。

(2) 稳定性则指的是系统对外界扰动的反应。

5. 流体静力学方程

(1) 静力学方程:

$$\frac{p_1}{\rho} + z_1 g = \frac{p_2}{\rho} + z_2 g$$

(2) 静力学方程物理意义: 描述在重力场中不可压缩同种静止流体内部压强能、位能之间的数量关系方程。表明位能、压强能两种能量之间可以互相转换, 但其和保持不变。

(3) 静力学方程使用条件: 重力场, 不可压缩, 同一种, 静止流体。

(4) 总势能: 压强能和位能都是势能, 二者之和为总势能。

6. 物料衡算——质量守恒方程

(1) 质量守恒方程:

$$q_m = \rho_1 u_1 A_1 = \rho_2 u_2 A_2$$

(2) 质量守恒方程物理意义: 考察选定的任意一个控制体, 单位时间内流入控制体和流出控制体的质量之差应等于单位时间控制体内物质的量积累。

(3) 平均流速: 在流体流动中按体积流量相等的原则来定义的流速。

7. 伯努利方程和机械能衡算方程

(1) 伯努利方程:

$$\frac{p_1}{\rho} + z_1 g + \frac{u_1^2}{2} = \frac{p_2}{\rho} + z_2 g + \frac{u_2^2}{2}$$

(2) 伯努利方程的物理意义: 不可压缩的理想流体在重力场中作定态流动时, 单位质量流体的位能、压强能、动能三种能量之间可以互相转换, 但其和保持不变。

(3) 伯努利方程的应用条件: 不可压缩、理想流体、重力场、定态流动。

(4) 机械能衡算方程:

$$\frac{p_1}{\rho} + z_1 g + \frac{u_1^2}{2} + h_e = \frac{p_2}{\rho} + z_2 g + \frac{u_2^2}{2} + h_f$$

(5) 机械能衡算方程的应用条件: 不可压缩, 实际流体, 重力场, 定态流动。

(6) 应用机械能衡算方程注意事项: 选取两个截面, 确定衡算范围; 选取基准水平面, 确定流体位能的大小; 选取压强基准, 可同时选用绝压或表压, 但方程两边基准必须一致。

(7) 均匀分布与均匀流段: 均匀分布指速度分布大小均匀。均匀流段指流段各流线为平行直线且与截面垂直, 定态流动条件下该流体截面没有加速度, 势能分布服从静力学原理。

8. 流体流动的类型

(1) 流体流动的类型有两种: 层流和湍流。

(2) 层流与湍流的本质区别: 在于是否存在流体质点在径向上的速度脉动。

(3) 层流与湍流的判据: 采用雷诺数 Re 判断流体流动的类型。① 当 $Re < 2\,000$ 时, 必定出现

层流;②当 $2\,000 \leq Re \leq 4\,000$ 时,有时出现层流,有时出现湍流,依赖于环境对流体流动干扰大小;③当 $Re > 4\,000$ 时,工业条件下,一般都出现湍流。

(4) 雷诺数:

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

(5) 雷诺数的物理意义:流动流体惯性力与黏性力的比值。

9. 边界层和边界层分离现象

(1) 边界层:流动流体与固体界面接触时,因壁面阻滞,与壁面接触的流体流速立即降为零,定义流速降为未受固体壁面影响流速的 99% 以内的区域为边界层,简言之,边界层是边界影响所及的区域。

(2) 边界层分离现象:边界层在与流动方向相反的黏性应力作用下,在流道扩大时边界层内的流体会逐渐增压减速。由于流体流动的连续性,流体在逆压梯度和剪应力作用下,会进一步减速,从而在流体内部出现流速为零的区域。因此,常把流动流体中,流速为零的流体脱离固体边界的现象称为边界层分离。

10. 流体流动的阻力损失

(1) 流体流动的阻力损失:包括直管阻力损失和局部阻力损失。

(2) 直管阻力损失:分为层流时直管阻力损失和湍流时直管阻力损失。

(3) 泊谟叶方程:流体在直管内作层流流动时,因阻力损失造成势能差的计算公式,

$$\Delta p = \frac{32\mu l u}{d^2}。$$

(4) 层流时直管阻力损失:

$$h_f = \frac{32\mu l u}{\rho d^2}$$

(5) 湍流时直管阻力损失: $h_f = \lambda \frac{l}{d} \frac{u^2}{2}$;若层流时,直管阻力损失采用湍流公式计算,对应的

$$\lambda = \frac{64}{Re}。$$

(6) 摩擦系数:工程上计算机械能损失的系数,常表示为雷诺数与相对粗糙度的函数形式。

(7) 局部阻力损失计算方法:常采用局部阻力系数法或当量长度法计算。

① 局部阻力系数法:

$$h_f = \zeta \frac{u^2}{2}$$

② 当量长度法:

$$h_f = \lambda \frac{l_e}{d} \frac{u^2}{2}$$

(8) 局部阻力当量长度:近似地认为流体通过局部管件(如弯头或阀门等)的阻力损失与流体通过某一长度的直管的阻力损失相等,此时所对应的直管长度称为局部阻力当量长度。

11. 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) 通过将变量组合成无量纲数群,减少变量个数并规划实验;
 (3) 通过实验数据,确定各无量纲数群之间的函数关系,测定参数值及适用范围。

12. 流速和流量的测量

- (1) 毕托管:常用以测量某点流速的装置。
 (2) 孔板流量计:利用流体流动时流道缩小产生的机械能损失测量流量的装置,管流时在管道内安装孔板,因而得名。该种流量计具有恒截面变压差的特点。
 (3) 转子流量计及其特点:流体流动时,利用转子在流体中的悬浮高度来测量流量的装置,应用范围较广,适用于清洁流体的流量计算。该种流量计具有恒压差、恒环隙流速而变流通面积的特点。使用时,需垂直安装;流体下进上出。

13. 非牛顿流体的主要特性

- (1) 非牛顿流体与牛顿流体的区别:层流时,符合牛顿黏性定律的流体称为牛顿流体,不符合牛顿黏性定律的流体称为非牛顿流体。
 (2) 非牛顿流体的主要特性:塑性、假塑性与胀塑性、触变性与震凝性、黏弹性。
 (3) 塑性流体特性:只有当施加的剪应力大于某一临界值之后流体才开始流动的特性。
 (4) 假塑性与胀塑性流体特性:假塑性流体在剪切率很低的范围内,黏度为一常数,其值相对较大;而后随剪切率增高,黏度下降。胀塑性流体的黏度随剪切率的增大而升高。
 (5) 触变性与震凝性流体特性:触变性流体在一定的剪应力所作用的时间足够长后,黏度达到定态的平衡值。震凝性流体的黏度随剪应力作用时间延长而增大。
 (6) 黏弹性流体特性:黏弹性流体不但有黏性,而且常表现出明显的弹性。

第2节 重点公式

1. 静力学方程

$$\frac{p_1}{\rho} + z_1 g = \frac{p_2}{\rho} + z_2 g$$

2. U形测压计

$$\Delta \mathcal{P} = R(\rho_i - \rho)g$$

3. 牛顿黏性定律

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

4. 质量守恒方程

$$q_m = \rho_1 u_1 A_1 = \rho_2 u_2 A_2$$

5. 伯努利方程

$$\frac{p_1}{\rho} + z_1 g + \frac{u_1^2}{2} = \frac{p_2}{\rho} + z_2 g + \frac{u_2^2}{2}$$

6. 机械能衡算方程

$$\frac{p_1}{\rho} + z_1 g + \frac{u_1^2}{2} + h_e = \frac{p_2}{\rho} + z_2 g + \frac{u_2^2}{2} + h_f$$

7. 雷诺数

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

8. 阻力损失

$$h_f = \lambda \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{u^2}{2}$$

9. 层流

$$\lambda = \frac{64}{Re} \text{ 或 } h_f = \frac{32\mu ul}{\rho d^2}$$

10. 局部阻力

$$h_f = \lambda \cdot \frac{l_e}{d} \cdot \frac{u^2}{2} \text{ 或 } h_f = \zeta \frac{u^2}{2}$$

11. 当量直径

$$d_e = \frac{4A}{\Pi} = \frac{4 \times \text{流通截面积}}{\text{湿润周边}}$$

12. 圆管内层流速分布

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

13. 毕托管

$$u_A = \sqrt{\frac{2R(\rho_i - \rho)g}{\rho}}$$

14. 孔板流量计

$$q_v = C_0 A_0 \sqrt{\frac{2\Delta \mathcal{P}}{\rho}}, \quad \Delta \mathcal{P} = R(\rho_i - \rho)g$$

15. 转子流量计

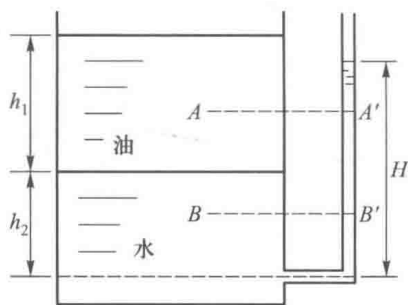
$$q_v = C_R A_0 \sqrt{\frac{2V_f(\rho_f - \rho)g}{\rho A_f}}$$

第3节 典型例题

例1 某敞口容器内盛有水与油,如附图所示。已知水及油的密度分别为 $1\,000\,\text{kg/m}^3$ 和 $860\,\text{kg/m}^3$, $h_1 = 600\,\text{mm}$, $h_2 = 800\,\text{mm}$, 试求:

(1) 高度 H 。

(2) A 与 A' 处于同一水平面, B 与 B' 处于同一水平面, 比较 A 点与 A' 点及 B 点与 B' 点之间压强大小。



例1 附图

解 (1) 根据题意可得静力学方程 $\rho_{\text{油}}gh_1 + \rho_{\text{水}}gh_2 = \rho_{\text{水}}gH$

其中 $h_1 = 600\,\text{mm}$, $h_2 = 800\,\text{mm}$, $\rho_{\text{水}} = 1\,000\,\text{kg/m}^3$, $\rho_{\text{油}} = 860\,\text{kg/m}^3$

代入数据

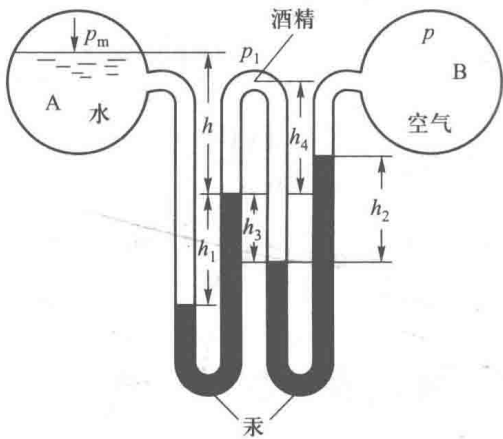
$$860 \times 9.81 \times 0.60 + 1\,000 \times 9.81 \times 0.8 = 1\,000 \times 9.81 \times H$$

解得 $H=1.32\text{ m}$

(2) 由流体静力学方程可知同种流体同一水平面的压强相同,所以 $p_B=p'_B$ 。A 点与 A' 点的压强,由流体静力学方程可知需要 B 点与 B' 点的压强减去 $\rho g\Delta h$,由于油的密度比水的密度小, Δh 相同,所以 A 点比 A' 点的压强大,即 $p_A>p'_A$ 。

说明 判断 $p_B=p'_B$ 和 $p_A=p'_A$ 是否成立实为判断 B-B' 和 A-A' 是否为等压面。根据等压面的四个必备条件(静止、连续、同种流体、同一水平高度)逐一判断可知 B-B' 是等压面,即 $p_B=p'_B$ 。

例 2 如附图所示,为一多管复式 U 形测压计。如果 $p_m=25\text{ kPa}$ (表压), $h=600\text{ mm}$, $h_1=200\text{ mm}$, $h_2=280\text{ mm}$, $h_3=150\text{ mm}$,汞的密度 $\rho=13\,600\text{ kg/m}^3$,酒精的密度 $\rho=843\text{ kg/m}^3$ 。试求容器 B 内的压强。



例 2 附图

解 设水的密度为 ρ_1 ,汞的密度 ρ_2 ,酒精的密度 ρ_3 。

假设倒 U 形管顶端压力为 p_1 ,且距离左侧汞柱顶端距离为 h_4 。

根据等压面静力学方程可得

$$\begin{aligned} p_m + \rho_1(h+h_1)g &= \rho_2 h_1 g + \rho_3 h_4 g + p_1 \\ p + \rho_2 h_2 g &= p_1 + \rho_3(h_3+h_4)g \end{aligned}$$

上述两式相减,整理可得

$$\begin{aligned} p &= p_m + \rho_1(h+h_1)g - \rho_2(h_1+h_2)g + \rho_3 h_3 g \\ &= [25 \times 10^3 + 1\,000 \times (0.6+0.2) \times 9.81 - 13\,600 \times (0.2+0.28) \times 9.81 + 843 \times 0.15 \times 9.81] \text{ Pa} \\ &= -2.995 \times 10^4 \text{ Pa} = -29.95 \text{ kPa(表压)} \end{aligned}$$

$$p_{\text{绝压}} = 71.375 \text{ kPa}$$

说明 用静力学原理解决问题时,首先应选取两个等压面,又称参考面,选择的条件是:①两个参考面之一应为压差计中两流体的交界面。②两个参考面应在同一水平上,而且两个面应在连通着的同一静止流体内部。

本例中由于连接两个 U 形测压计的中间液体与复式 U 形测压计两端引压管中液体种类不同,计算时不能把指示剂的高度差加和,必须利用静力学原理分段计算。

例 3 如附图所示,水以 $70\text{ m}^3/\text{h}$ 的体积流量在一倾斜管中流过,此管的内径由 100 mm 突然扩大到 200 mm 。A、B 两点的垂直距离为 0.2 m 。在此两点间连接一 U 形测压计,指示液为四

氯化碳,其密度为 $1\,630\text{ kg/m}^3$ 。若忽略阻力损失,试求:

(1) U形管两侧的指示液液面哪侧高,相差多少毫米?

(2) 若将上述扩大管道改为水平放置,测压计的读数有何变化?

(3) 倾斜放置与水平放置时,A、B间的压差分别为多少?

(4) 若只考虑流体经过管道突然扩大时的局部阻力,阻力系数为 $\zeta=(1-d_A^2/d_B^2)^2$,此时压差计的读数为多少?

解 (1) 取 A、B 两个管截面列伯努利方程得

$$\frac{\mathcal{P}_A}{\rho} + \frac{u_A^2}{2} = \frac{\mathcal{P}_B}{\rho} + \frac{u_B^2}{2}$$

得

$$\Delta\mathcal{P}_{AB} = \mathcal{P}_A - \mathcal{P}_B = \frac{\rho}{2}(u_B^2 - u_A^2)$$

$$u_A = \frac{q_V}{0.25\pi d_A^2} = \left(\frac{70/3\,600}{0.785 \times 0.1^2} \right) \text{ m/s} = 2.48 \text{ m/s}$$

$$u_B = \frac{q_V}{0.25\pi d_B^2} = \left(\frac{70/3\,600}{0.785 \times 0.2^2} \right) \text{ m/s} = 0.62 \text{ m/s}$$

$$\Delta\mathcal{P}_{AB} = [1\,000 \times (0.62^2 - 2.48^2) / 2] \text{ N/m}^2 = -2\,883 \text{ N/m}^2$$

所以, $\mathcal{P}_A < \mathcal{P}_B$

因而

$$\Delta\mathcal{P}_{BA} = Rg(\rho_i - \rho)$$

指示液液面左高右低。

$$R = \frac{\Delta\mathcal{P}_{BA}}{(\rho_i - \rho)g} = \left[\frac{2\,883}{(1\,630 - 1\,000) \times 9.81} \right] \text{ m} = 0.466 \text{ m} = 466 \text{ mm}$$

(2) 若改为水平放置后,由于 u_A 、 u_B 不变,则 $\Delta\mathcal{P}_{AB}$ 也不变,由 $\Delta\mathcal{P}_{BA} = Rg(\rho_i - \rho)$ 可得 R 值也不变,即测压计指示的是总势能差。

(3) 水平放置时, $z_A = z_B$

$$\Delta\mathcal{P}_{AB} = \mathcal{P}_A - \mathcal{P}_B = (p_A + \rho g z_A) - (p_B + \rho g z_B)$$

所以,

$$\Delta p_{AB} = p_A - p_B = \Delta\mathcal{P}_{AB} - \rho g(z_A - z_B) = \Delta\mathcal{P}_{AB} = -2\,883 \text{ Pa}$$

倾斜放置时

$$\Delta\mathcal{P}_{AB} = \mathcal{P}_A - \mathcal{P}_B = (p_A + \rho g z_A) - (p_B + \rho g z_B)$$

所以,

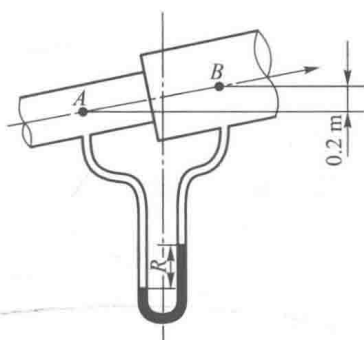
$$\Delta p_{AB} = p_A - p_B = \Delta\mathcal{P}_{AB} - \rho g(z_A - z_B)$$

所以,

$$\Delta p_{AB} = (-2\,883 + 1\,000 \times 9.81 \times 0.2) \text{ Pa} = -921 \text{ Pa}$$

(4) 阻力系数 $\zeta = (1 - d_A^2/d_B^2)^2 = 0.562\,5$

$$\frac{\mathcal{P}_A}{\rho} + \frac{u_A^2}{2} = \frac{\mathcal{P}_B}{\rho} + \frac{u_B^2}{2} + \sum h_f$$



例 3 附图

所以,

$$\Delta \mathcal{P}_{AB} = \mathcal{P}_A - \mathcal{P}_B = \frac{\rho}{2} (u_B^2 - u_A^2) + \rho \zeta \frac{u_A^2}{2}$$

所以,

$$\Delta \mathcal{P}_{AB} = [500 \times (0.62^2 - 2.48^2) + 500 \times 2.48^2 \times 0.5625] \text{ Pa} = -1153 \text{ Pa}$$

则, $\mathcal{P}_A < \mathcal{P}_B$

因而 $\Delta \mathcal{P}_{BA} = Rg(\rho_i - \rho)$

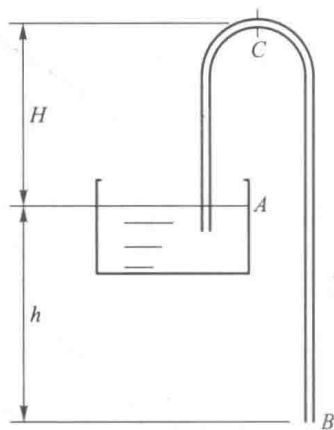
指示液液面左高右低。

$$R = \frac{\Delta \mathcal{P}_{BA}}{(\rho_i - \rho)g} = \left[\frac{1153}{(1630 - 1000) \times 9.81} \right] \text{ m} = 0.187 \text{ m} = 187 \text{ mm}$$

说明 ① 在管径及管内流速相同情况下, U 形测压计读数与管路放置方式无关, 即不论管路倾斜、水平或垂直放置, U 形测压计读数 R 均相同。② U 形测压计测量的是虚拟压强差, 不是压强差。只有当管道水平放置的时候, 测量的才是压强差。③ 当考虑阻力损失时, U 形测压计测量的也是管路的阻力损失与动能差之和。

例 4 如附图所示, 利用虹吸管将池 A 中的水引出, 已知虹吸管内径为 20 mm, 出口 B 与池 A 中液面垂直高度差 $h = 4 \text{ m}$, 管路顶点 C 与池 A 中液面垂直高度差 $H = 3 \text{ m}$ 。虹吸管 AC 段管长 9 m, BC 段管长 15 m (均包括局部阻力的当量长度), 摩擦系数可取为 0.023。该操作条件下, 水的密度 $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$, 水的饱和蒸气压 $p_v = 1.23 \times 10^4 \text{ N/m}^2$, 当地大气压为 101.3 kPa。若开始时, 管内均充满流体, 试求:

- (1) 若不考虑流动阻力的情况下, 水在管内的流量是多少?
- (2) 若不考虑流动阻力的情况下, 且 h 不变, 求管路顶点 C 可提升的最大高度是多少?
- (3) 若考虑流动阻力的情况下, 水在管内的流量是多少?
- (4) 若考虑流动阻力的情况下, 且 h 不变, 求管路顶点 C 可提升的最大高度是多少?
- (5) 若考虑流动阻力的情况下, $H = 9 \text{ m}$, 且 h 不变, 水在管内的流量是多少?



例 4 附图

解 (1) 选取截面 A 与截面 B, 列机械能衡算方程得

$$\frac{p_A}{\rho} + \frac{1}{2} u_A^2 + z_A g = \frac{p_B}{\rho} + \frac{1}{2} u_B^2 + z_B g$$

其中 $z_A - z_B = 4 \text{ m}$, $u_A = 0$, $p_A = p_B = p_a$

代入数据可得

$$4 \text{ m} \times 9.81 \text{ m/s}^2 = 0.5 u_B^2$$

解得 $u_B = 8.86 \text{ m/s}$

$$q_v = \frac{1}{4} \pi d^2 u_B = \left(\frac{1}{4} \times 3.14 \times 0.02^2 \times 8.86 \right) \text{ m}^3/\text{s} = 2.78 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s} = 10.01 \text{ m}^3/\text{h}$$

验算该状态下, C 点是否会汽化。

选择 A 和 C 点所在的截面衡算得

$$\begin{aligned} \frac{p_A}{\rho} + \frac{1}{2} u_A^2 + z_A g &= \frac{p_C}{\rho} + \frac{1}{2} u_C^2 + z_C g \\ u_A &= 0, \quad u_C = 8.86 \text{ m/s} \end{aligned}$$

代入数据

$$9.81 \times 3 = \frac{1.013 \times 10^5 - p_C}{1000} - \frac{8.86^2}{2}$$

解得 $p_C = 3.26 \times 10^4 \text{ Pa} > p_v$, 可见 C 处不会发生汽化, 计算有效。

(2) 随着 C 点位置的提高, 压强降低, 当 C 点提高到一定高度时, C 处压强将降到水的饱和蒸气压, 液体汽化, 流体不再连续。以此可确定 C 点的提升高度。

选择 A 和 C 点所在的截面衡算得

$$\frac{p_A}{\rho} + \frac{1}{2} u_A^2 + z_A g = \frac{p_C}{\rho} + \frac{1}{2} u_C^2 + z_C g$$

$$u_A = 0, u_C = 8.86 \text{ m/s}, p_A = p_a, p_C = p_v = 1.23 \times 10^4 \text{ Pa}, H = z_C - z_A$$

代入数据可得

$$9.81 \times H = \frac{1.013 \times 10^5 - 1.23 \times 10^4}{1000} - \frac{8.86^2}{2}$$

解得 $H = 5.07 \text{ m}$

(3) 选取截面 A 与截面 B 衡算得

$$\frac{p_A}{\rho} + \frac{1}{2} u_A^2 + z_A g = \frac{p_B}{\rho} + \frac{1}{2} u_B^2 + z_B g + h_{fACB}$$

其中 $z_A - z_B = 4 \text{ m}$, $u_A = 0$, $p_A = p_B = p_a$, 其中

$$h_{fACB} = \lambda \frac{l_{ACB}}{d} \frac{u^2}{2}$$

代入数据可得

$$4 \times 9.81 = 0.5 u_B^2 + 0.023 \times \frac{24}{0.02} \frac{u_B^2}{2}$$

解得 $u_B = 1.66 \text{ m/s}$

$$q_V = \frac{1}{4} \pi d^2 u_B = \left(\frac{1}{4} \times 3.14 \times 0.02^2 \times 1.66 \right) \text{ m}^3/\text{s} = 5.21 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s} = 1.88 \text{ m}^3/\text{h}$$

同样验算该状态下, C 点是否会汽化。

选择 A 和 C 点所在的截面衡算得

$$\frac{p_A}{\rho} + \frac{1}{2} u_A^2 + z_A g = \frac{p_C}{\rho} + \frac{1}{2} u_C^2 + z_C g + h_{fACB}$$

代入数据

$$u_A = 0, u_C = 1.66 \text{ m/s}$$

$$9.81 \times 4 = \frac{1.013 \times 10^5 - p_C}{1000} - \left(1 + 0.023 \times \frac{9}{0.02} \right) \frac{1.66^2}{2}$$

解得 $p_C = 4.64 \times 10^4 \text{ Pa} > p_v$, 可见 C 处不会发生汽化, 计算有效。

问题(4)与问题(2)同理

(4) 选择 A 和 C 点所在的截面衡算得

$$\frac{p_A}{\rho} + \frac{1}{2} u_A^2 + z_A g = \frac{p_C}{\rho} + \frac{1}{2} u_C^2 + z_C g + h_{fAC}$$

$$u_A = 0, u_C = 1.66 \text{ m/s}, p_A = p_a, p_C = p_v = 1.23 \times 10^4 \text{ Pa}, H = z_C - z_A$$

代入数据可得

$$9.81 \times H = \frac{1.013 \times 10^5 - 1.23 \times 10^4}{1000} - \left(1 + 0.023 \times \frac{9}{0.02} \right) \frac{1.66^2}{2}$$

解得 $H = 7.48 \text{ m}$

(5) 由问题(4)可知,当 $H = 9 \text{ m}$ 时,虹吸管内液体上升到一定高度后,液体将不再连续。选择 A 所在的截面和液体上升到最大高度处的截面衡算得

$$\frac{p_A}{\rho} + \frac{1}{2} u_A^2 + z_A g = \frac{p_1}{\rho} + \frac{1}{2} u_1^2 + z_1 g + h_{fA1}$$

$$u_A = 0, p_A = p_a, p_C = p_v = 1.23 \times 10^4 \text{ Pa}, H = 7.48 \text{ m}$$

代入数据可得

$$7.48 \times 9.81 = \frac{1.013 \times 10^5 - 1.23 \times 10^4}{1000} - \left(1 + 0.023 \times \frac{7.48}{0.02} \right) \frac{u_1^2}{2}$$

解得 $u_1 = 1.80 \text{ m/s}$

$$q_v = \frac{1}{4} \pi d^2 u_1 = \left(\frac{1}{4} \times 3.14 \times 0.02^2 \times 1.80 \right) \text{ m}^3/\text{s} = 5.65 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s} = 2.03 \text{ m}^3/\text{h}$$

因此出口流量为 $2.03 \text{ m}^3/\text{h}$ 。

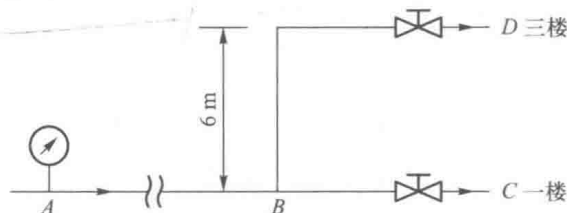
说明 虹吸管是实际中经常遇到的管路,由以上计算可知:① 输送量与液体进口端液面和出口端液面的垂直高度差有关,高度差越大,流量越大。② 虹吸管的顶点不宜过高,以避免液体在管路中汽化,尤其是输送温度较高、易挥发的液体时更需注意。③ 若虹吸管的顶点过高引起管内液体汽化后,即使进一步增加液体进口端液面和出口端液面的垂直高度差,流量也不变。

例 5 某办公楼输水管路如附图所示,总管 AB 在 B 处分成两路各通向一楼和三楼。 BC 和 BD 两支管各安装一个调节阀,出口分别为 C 和 D 。已知管段 AB 、 BC 和 BD 的长度分别为 120 m 、 10 m 和 20 m (包括直管长度及管件的当量长度,但不包括阀门的当量长度),管内径皆为 30 mm 。假定总管 A 处的表压为 0.35 MPa ,不考虑分支点 B 处的动能交换和能量损失,且可认为各管段内的流动均进入阻力平方区,摩擦系数皆为 0.03 ,试求:

(1) 当一楼阀门全开 ($\zeta = 6.4$) 时,三楼是否有水供应? 管路 AB 中的流量为多少?

(2) 当一楼阀门全关,三楼阀门全开 ($\zeta = 6.4$) 时,管路 AB 中的流量为多少?

(3) 当一楼阀门及三楼阀门全开 ($\zeta = 6.4$) 时,且要求三楼也能有 $6 \text{ m}^3/\text{h}$ 的体积流量,此时一楼的体积流量为多少,总管 A 处的压强为多少兆帕?



例 5 附图

解 (1) 选取总管 A 处与支管 C 处的截面衡算得

$$\frac{p_A}{\rho} + \frac{1}{2} u_A^2 + z_A g = \frac{p_C}{\rho} + \frac{1}{2} u_C^2 + z_C g + h_{fA-C}$$

其中, $z_A = z_C, p_C = p_a$

为判断三楼是否有水供应,可先假设 BD 管段流量为零,通过管路计算确定 B 点的压强,然后由静力学原理,讨论 BD 管是否有水供应。

因此有 $q_{V,A} = q_{V,C}$,得 $u_A = u_C = u$

其中

$$h_{\text{fA-C}} = \left(\lambda \frac{l_{AB} + l_{BC}}{d} + \zeta \right) \frac{u^2}{2}$$

可得

$$\frac{p_A}{\rho} = \left(\lambda \frac{l_{AB} + l_{BC}}{d} + \zeta \right) \frac{u^2}{2}$$

代入数据得

$$\left(0.03 \times \frac{120+10}{30 \times 10^{-3}} + 6.4 \right) \frac{u^2}{2} = \frac{0.35 \times 10^6}{1\,000}$$

解得 $u = 2.27 \text{ m/s}$

选取总管 A 处与总管 B 处衡算得

$$\frac{p_A}{\rho} + \frac{1}{2} u_A^2 + z_A g = \frac{p_B}{\rho} + \frac{1}{2} u_B^2 + z_B g + h_{\text{fA-B}}$$

其中, $z_A = z_B, u_A = u_B = u$, 则

$$h_{\text{fA-B}} = \lambda \frac{l_{AB}}{d} \frac{u^2}{2}$$

可得

$$\frac{p_B}{\rho} = \frac{p_A}{\rho} - \lambda \frac{l_{AB}}{d} \frac{u^2}{2}$$

代入数据得

$$\frac{p_B}{1\,000} = \frac{0.35 \times 10^6}{1\,000} - 0.03 \times \frac{120}{30 \times 10^{-3}} \times \frac{2.27^2}{2}$$

解得 $p_B(\text{表}) = 4.08 \times 10^4 \text{ Pa}$

$$p_B(\text{表}) < \rho g(z_D - z_B) = (1\,000 \times 9.81 \times 6) \text{ Pa} = 5.89 \times 10^4 \text{ Pa}$$

可知三楼没有水供应,此时管路 AB 中流量为

$$q_{V,AB} = \frac{1}{4} \pi d^2 u = (0.25 \times 3.14 \times 0.03^2 \times 2.27) \text{ m}^3/\text{s} = 1.60 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s} = 5.76 \text{ m}^3/\text{h}$$

(2) 一楼阀门全关,三楼阀门全开时, $q_{V,C} = 0, q_{V,A} = q_{V,D}$

各个管路管径相同,流速关系为 $u_A = u_D = u$

选取总管 A 处与支管 D 处的截面衡算得

$$\frac{p_A}{\rho} + \frac{1}{2} u_A^2 + z_A g = \frac{p_D}{\rho} + \frac{1}{2} u_D^2 + z_D g + h_{\text{fA-D}}$$

其中, $z_D - z_A = 6 \text{ m}, p_D(\text{表}) = 0$,

$$h_{\text{fA-D}} = \lambda \frac{l_{AB}}{d} \frac{u_A^2}{2} + \left(\lambda \frac{l_{BD}}{d} + \zeta \right) \frac{u_D^2}{2}$$

代入数据可得

$$\frac{0.35 \times 10^6}{1\,000} = 6 \times 9.81 + 0.03 \times \frac{120}{0.03} \frac{u^2}{2} + \left(0.03 \times \frac{20}{0.03} + 6.4 \right) \frac{u^2}{2}$$