




普通高等教育“十二五”规划教材

PUTONG GAODENG JIAOYU "12·5" GUIHUA JIAOCAI

流体力学及输配管网 学习指导

主 编 马庆元 郭继平
副主编 周卫红

 冶金工业出版社
Metallurgical Industry Press



普通高等教育“十二五”规划教材

流体力学及输配管网学习指导

主 编 马庆元 郭继平
副主编 周卫红

北 京

冶金工业出版社

2012

内 容 提 要

本书是与普通高等教育“十二五”规划教材《流体力学及输配管网》(冶金工业出版社, 2011年)配套的学习辅导材料。全书共有十四章, 内容主要包括流体静力学、一元流体动力学、流动阻力及能量损失、孔口出流与管嘴出流、气体射流、不可压缩流体动力学、泵与风机、管路与管网、气体管流水力特征与水力计算、液体输配管网水力特征与水力计算、泵和风机与管网系统的匹配、流体输配管网水力工况分析与调节等, 和《流体力学及输配管网》相匹配。各章均设有基本知识点、难点、习题详解和练习题四大模块。其中, 习题详解模块对配套教材中的典型习题进行了分析详解; 练习题模块中含有以往研究生入学考试和注册工程师考试的部分试题, 绝大部分练习题有参考答案。

本书可作为土木工程、建筑环境与设备工程、环境工程、市政工程、机械、冶金和化工等专业的教学参考书, 也可供报考研究生、注册工程师以及从事相关专业的人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

流体力学及输配管网学习指导/马庆元, 郭继平主编. —北京: 冶金工业出版社, 2012. 7

普通高等教育“十二五”规划教材

ISBN 978-7-5024-5966-6

I. ①流… II. ①马… ②郭… III. ①流体力学—高等学校—教学参考资料 ②房屋建筑设备—流体输送—管网—高等学校—教学参考资料 IV. ①O35 ②TU81

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第148259号

出版人 曹胜利

地 址 北京北河沿大街嵩祝院北巷39号, 邮编100009

电 话 (010)64027926 电子信箱 yjchs@cnmip.com.cn

责任编辑 陈慰萍 美术编辑 李新 版式设计 孙跃红

责任校对 卿文春 责任印制 牛晓波

ISBN 978-7-5024-5966-6

三河市双峰印刷装订有限公司印刷; 冶金工业出版社出版发行; 各地新华书店经销

2012年7月第1版, 2012年7月第1次印刷

787mm×1092mm 1/16; 10.25印张; 244千字; 152页

22.00元

冶金工业出版社投稿电话:(010)64027932 投稿信箱:tougao@cnmip.com.cn

冶金工业出版社发行部 电话:(010)64044283 传真:(010)64027893

冶金书店 地址:北京东四西大街46号(100010) 电话:(010)65289081(兼传真)

(本书如有印装质量问题, 本社发行部负责退换)

前 言

本书是与马庆元、郭继平教授主编的普通高等教育“十二五”规划教材《流体力学及输配管网》（冶金工业出版社，2011年）相配套的课程学习指导书。本书旨在帮助读者掌握流体力学及输配管网课程的学习方法，加深对基本概念、基础理论的理解，提高分析和解决实际工程问题的能力，同时为本课程的任课教师提供教学思路和大量具有工程背景的教学案例。本书也可作为相关专业人员报考研究生、注册工程师的参考用书。

全书共分十四章，与配套教材一一对应。每章除了归纳出主要知识点、学习难点外，还对典型习题（习题编号与教材一致）作了详解，并附数量充分的习题。

本书是长期从事流体力学及输配管网课程教学的老师们教学经验的总结与升华，内容精练，思路清晰，重点突出，案例充实，注重学生创新意识和工程能力的培养。流体力学及输配管网课程计划学时为108学时，编者尝试处理好本科教学与研究生入学考试、注册工程师资格考试的关系，对重点内容和一般性内容进行了分割和取舍，使本套教材的实用性更强。

本书除个别地方为了达到特殊目的之外，所有物理量均采用国际单位制。

本书是以配套教材为依托的学习辅导材料，读者应以阅读教材为基础，本书不追求内容、体系的完整性。

本书主编为马庆元、郭继平教授，马庆元教授负责本书总体内容的编排，郭继平教授负责编写第10~14章，周卫红负责编写第1~9章，并对习题、例题进行了认真的筛选。

由于编者水平所限，书中疏漏在所难免，恳请广大读者批评、斧正。

编 者
2012年5月

目 录

第一章 绪论	1
一、基本知识点	1
(一) 基本概念	1
(二) 液体的压缩性和膨胀性	1
(三) 气体的压缩性和热胀性	1
(四) 牛顿内摩擦定律	2
二、难点	2
三、习题详解	2
四、练习题	4
第二章 流体静力学	6
一、基本知识点	6
(一) 静止或相对平衡流体的基本方程	6
(二) 流体静压强的两个重要特征	6
(三) 静止流体压强的分布规律	6
(四) 压强的表示方法与单位	7
(五) 等压面	7
(六) 液体的相对平衡	7
二、难点	9
三、习题详解	9
四、练习题	12
第三章 一元流体动力学基础	16
一、基本知识点	16
(一) 基本概念	16
(二) 流速和流量	16
(三) 连续性方程	16
(四) 恒定元流能量方程	17
(五) 过流断面的压强分布	17
(六) 恒定总流能力方程	18
(七) 恒定气流能量方程	18
(八) 总水头线和测压管水头线	19

(九) 总压线和势压线	19
二、难点	20
三、习题详解	20
四、练习题	25
第四章 流动阻力及能量损失	28
一、基本知识点	28
(一) 沿程损失和局部损失表达式——达西 (Darcy) 公式	28
(二) 流态的判定准则——临界雷诺数	28
(三) 圆管中的层流运动	29
(四) 紊流流动的特征与紊流阻力	29
(五) 非圆管的沿程损失	31
(六) 典型局部损失计算公式	31
二、难点	32
三、习题详解	34
四、练习题	41
第五章 孔口出流与管嘴出流	44
一、基本知识点	44
(一) 各种出流方式的概念及特点	44
(二) 各种出流方式出流能力的计算	45
二、难点	46
三、习题详解	46
四、练习题	49
第六章 气体射流	52
一、基本知识点	52
(一) 射流的分类	52
(二) 结构特征	52
(三) 计算公式	53
(四) 温差和浓差射流	54
二、难点	55
三、习题详解	56
四、练习题	60
第七章 不可压缩流体动力学基础	62
一、基本知识点	62
(一) 流体微团运动分析	62
(二) 涡量、涡线、涡通量	62

(三) 不可压缩流体连续性方程	63
(四) 以应力表示的黏性流体运动微分方程	63
(五) 纳维-斯托克斯方程 (N-S 方程)	63
(六) 满足理想流体恒定能量方程的情况	64
二、难点	64
三、习题详解	64
四、练习题	66
第八章 一元气体动力学基础	68
一、基本知识点	68
(一) 几种流动过程的能量方程	68
(二) 声速、滞止参数、马赫数	69
(三) 气体一元恒定流动的连续性方程	70
(四) 管路中的流动	70
(五) 管路流动的特征	71
二、难点	71
三、习题详解	72
四、练习题	75
第九章 泵与风机的理论基础	77
一、基本知识点	77
(一) 离心式泵与风机的性能参数	77
(二) 流体在叶轮中运动的速度三角形	77
(三) 欧拉方程	78
(四) 泵或风机的能量损失与对应功率	78
(五) 泵或风机性能曲线	81
(六) 相似律与比转数	81
二、难点	82
三、习题详解	83
四、练习题	85
第十章 管路与管网基础	87
一、基本知识点	87
(一) 简单管路	87
(二) 复杂管路	88
(三) 管网	89
(四) 通风空调工程空气输配管网	89
(五) 燃气输配管网	90
(六) 采暖空调冷热水管网类型	90

二、难点	90
三、习题详解	91
四、练习题	95
第十一章 气体管流水力特征与水力计算	97
一、基本知识点	97
(一) 气体管流水力特征	97
(二) 流体输配管网水力计算基本原理与方法	97
(三) 常用的水力计算方法	97
(四) 通风空调工程气体输配管网水力计算	98
(五) 均匀送风管道设计	99
二、难点	99
三、习题详解	100
四、练习题	102
第十二章 液体输配管网水力特征与水力计算	104
一、基本知识点	104
(一) 重力循环液体管路和机械循环液体管路的工作原理	104
(二) 重力循环液体管路和机械循环液体管路的作用动力	104
(三) 重力循环液体管网的水力特征	105
(四) 液体管网的水力计算	107
(五) 液体管网水力计算的主要任务和方法	109
(六) 机械循环室内水系统的水力计算方法	110
(七) 室外热水供水管网的水力计算	111
二、难点	111
三、习题详解	112
四、练习题	117
第十三章 泵、风机与管网系统的匹配	119
一、基本知识点	119
(一) 阻力特征	119
(二) 管网特性曲线	119
(三) 泵、风机在管网系统中的工作状态	120
(四) 管网系统中泵(或风机)的联合运行	120
(五) 泵、风机的工况调节	121
(六) 泵与风机的安装位置	123
(七) 泵、风机的选用	126
二、难点	127
三、习题详解	128

四、练习题	132
第十四章 流体输配管网水力工况分析与调节	135
一、基本知识点	135
(一) 液体管网压力分布图——水压图	135
(二) 气体管网压力分布图	136
(三) 管网水力失调与水力稳定性	137
(四) 管网系统水力工况的分析方法	138
(五) 提高管网水力稳定性的途径与方法	138
(六) 管网系统水力平衡调节	138
(七) 管网中节点流量的确定	140
(八) 环状管网水力计算的基本步骤	141
(九) 环状管网的水力工况分析	141
(十) 环状管网的水力工况调节	142
二、难点	142
三、习题详解	143
四、练习题	149
参考文献	152

第一章 绪 论

一、基本知识点

(一) 基本概念

质量力、表面力、黏性、黏滞力、密度、压缩系数、体膨胀系数。

(二) 液体的压缩性和膨胀性

(1) 压缩系数:
$$\alpha_p = \frac{d\rho/\rho}{dp} = -\frac{dV/V}{dp}$$

(2) 弹性模量:
$$E = \frac{1}{\alpha_p} = \frac{dp}{d\rho/\rho} = -\frac{dp}{dV/V}$$

(3) 体膨胀系数:
$$\alpha_v = -\frac{d\rho/\rho}{dT} = \frac{dV/V}{dT}$$

(三) 气体的压缩性和热胀性

气体的压缩性和热胀性可用理想气体状态方程或实际气体状态方程来求解。

(1) 理想气体状态方程:

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

式中 p ——气体的绝对压强, Pa;

T ——气体的热力学温度, K;

ρ ——气体的密度, kg/m^3 ;

R ——气体常数, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$, 对于空气, $R = 287$; 对于其他气体, 在标准状态下 $R = 8314/n$, 其中 n 为气体的相对分子质量。

(2) 实际气体状态方程:

$$\frac{p}{\rho} = ZRT \quad (1-2)$$

式中 Z ——压缩因子。

注意: (1) 当气体压力较低、密度远小于极限密度时, 气体参数符合式 (1-1)。当压强增大到一定程度, 气体状态参数之间的关系不服从理想气体状态方程, 此时的气体称为真实气体。而描述真实气体 p 、 V 、 T 之间关系的表达式很多, 这里只给出以压缩因子表示的实际气体状态方程, 即式 (1-2)。

(2) 液体的热胀性和压缩性一般很小, 多数情况下可以忽略不计。但在热水采暖、水击等情况下, 往往要考虑水的压缩性和热胀性。

(四) 牛顿内摩擦定律

$$T = \mu A \frac{du}{dy} \quad (1-3)$$

$$\tau = \frac{T}{A} = \mu \frac{du}{dy} \quad (1-4)$$

式中 τ ——切应力, Pa;

T ——内摩擦力, N;

μ ——动力黏度, $\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$ 或 $\text{Pa} \cdot \text{s}$;

A ——接触面积, m^2 ;

$\frac{du}{dy}$ ——速度梯度, s^{-1} 。

动力黏度和运动黏度之间的关系为:

$$\nu = \mu/\rho \quad (1-5)$$

式中 ν ——运动黏度, m^2/s 。

二、难点

气体和液体的黏度随温度和压强变化规律。

液体的黏性随温度升高而减小, 气体的黏性随温度升高而增大。压强对气体和液体的黏性影响不大。气体在小于几个大气压的压强的作用下, 可认为其动力黏度与压强无关, 但在高压下, 气体和液体的动力黏度都随压强的升高而增大。

是不是任何情况下都需要考虑气体的压缩性?

当气体以较低速度 (不大于 68m/s) 流动时, 流动过程中压强和温度的变化较小, 密度可认为是常数, 此时气体称为不可压缩气体。反之, 当气体流动速度较高时, 流动过程中密度变化很大, 此时气体称为可压缩气体, 如燃气高压长输管线等。

三、习题详解

【习题 1-6】 在图 1-1 中, 汽缸内壁的直径 $D = 12\text{cm}$, 活塞的直径 $d = 11.96\text{cm}$, 活塞的长度 $l = 14\text{cm}$, 活塞运动的往复的速度为 1m/s , 润滑油的 $\mu = 1.0\text{Pa} \cdot \text{s}$, 试问作用在活塞上的黏滞力为多少?

解: 因黏性作用, 与汽缸壁接触的润滑油层速度为零, 活塞外沿的速度与活塞的运动速度相同, 即 $v = 1\text{m/s}$ 。由于活塞与汽缸的间隙很小, 速度分布近似认为是直线分布, 如图 1-1 (b) 所示。故

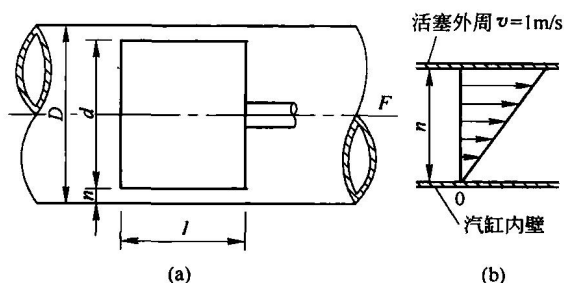


图 1-1 习题 1-6 图

$$\frac{du}{dy} = \frac{v}{n} = \frac{1}{\frac{1}{2} \times (0.12 - 0.1196)} = 5 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$$

由内摩擦定律有:

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} = 0.1 \times 5 \times 10^3 = 5 \times 10^3 \text{ N/m}^2$$

接触面积为:

$$A = \pi dl = 3.14 \times 0.1196 \times 0.14 = 0.053 \text{ m}^2$$

所以黏滞力为:

$$T = A \tau = 0.053 \times (5 \times 10^3) = 265 \text{ N}$$

【习题 1-7】一圆锥体绕其垂直中心轴等速旋转 (见图 1-2), 圆锥体与固定壁间的距离 $\delta = 1 \text{ mm}$, 全部为润滑油 ($\mu = 0.1 \text{ Pa} \cdot \text{s}$) 充满。当旋转角速度 $\omega = 16 \text{ s}^{-1}$, 锥体底部半径 $R = 0.3 \text{ m}$, 高 $H = 0.5 \text{ m}$ 时, 求作用于圆锥的阻力矩。

解: 已知阻力矩 M 为:

$$M = Tr = \tau Ar = \mu A \frac{du}{dy} r = \mu A \frac{d(\omega r)}{dy} r$$

由于在圆锥的不同位置, 半径不等, 故圆锥侧面上各点的速度和阻力矩也不同, 总的阻力矩需积分而得。

取 r 到 $r + dr$ 一微元圆台为研究对象, 则在半径 r 处的

速度梯度为 $\frac{du}{dy} = \frac{\omega r}{\delta}$, 假定微元圆台的侧面积为 dA , 则微元圆台的阻力矩为:

$$dM = Tr = \tau Ar = \mu A \frac{du}{dy} r = \frac{\mu \omega r}{\delta} \cdot r \cdot dA \quad (1-6)$$

$$dA = \pi(r + dr + r) \frac{dr}{\sin \theta} = \pi[2rdr + (dr)^2] \frac{1}{\sin \theta} \quad (1-7)$$

将式 (1-7) 代入式 (1-6) 得:

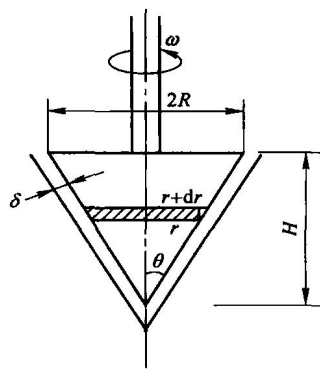


图 1-2 习题 1-7 图

$$dM = \frac{\mu\omega r}{\delta} \cdot r \cdot \frac{2\pi r dr}{\sin\theta}$$

因为 $(dr)^2 \approx 0$, 所以 $dA = 2\pi r dr / \sin\theta$, $\sin\theta = \frac{R}{\sqrt{R^2 + H^2}}$ 。对 dM 进行积分, 即可得圆锥体所受阻力矩为:

$$\begin{aligned} M &= \int_0^R \frac{\mu\omega r}{\delta} \cdot r \cdot \frac{2\pi r}{\sin\theta} dr = \frac{2\pi\mu\omega}{\delta\sin\theta} \int_0^R r^3 dr = \frac{\pi\mu\omega R^3}{2\delta} \frac{\sqrt{R^2 + H^2}}{R} \\ &= \frac{3.14 \times 0.1 \times 16 \times 0.3^3 \times \sqrt{0.3^2 + 0.5^2}}{2 \times 1 \times 10^{-3}} = 39.51 \text{ N} \cdot \text{m} \end{aligned}$$

四、练习题

- 1-1 将一容器内的空气压缩, 使其压强从 $p_1 = 0.98 \times 10^5 \text{ Pa}$ 增至 $p_2 = 5.88 \times 10^5 \text{ Pa}$, 温度从 20°C 升至 78°C , 问空气的体积减小了多少? (答案: 86%)
- 1-2 计算压力为 600 kN/m^2 、温度为 25°C 的氯气的密度、重力密度和比体积。已知气体常数为 $8314 \text{ J}/(\text{kmol} \cdot \text{K})$, 氯气的相对分子质量为 71。(答案: 17.2 kg/m^3 ; 169 N/m^3 ; $0.058 \text{ m}^3/\text{kg}$)
- 1-3 已知干空气的组成成分的体积分数为氧气 21%、氮气 78%、氩气 1%, 试求干空气在压力为 $9.81 \times 10^4 \text{ Pa}$ 及温度为 100°C 时的密度。(答案: 0.916 kg/m^3)
- 1-4 动力黏度 $\mu = 0.065 \text{ N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$ 的油充满在活塞和汽缸的间隙中, 汽缸直径 $D = 12 \text{ cm}$, 间隙 $\delta = 0.4 \text{ mm}$, 活塞长 $L = 14 \text{ cm}$, 如图 1-3 所示, 若对活塞施以 8.6 N 的力, 求活塞的运动速度。(答案: 1.01 m/s)
- 1-5 如图 1-4 所示, 一自重为 9 N 的圆柱体, 直径 $d = 149.4 \text{ mm}$, 在一内径 $D = 150 \text{ mm}$ 的圆管中下滑, 若圆柱体高度 $h = 150 \text{ mm}$, 均匀下滑的速度 $u = 46 \text{ mm/s}$, 求圆柱体和管壁间隙中油液的动力黏度。(答案: $0.83 \text{ Pa} \cdot \text{s}$)

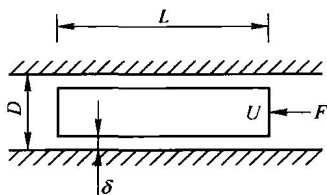


图 1-3 题 1-4 图

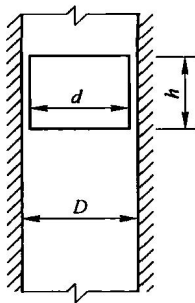


图 1-4 题 1-5 图

- 1-6 黏度测量仪由内外两个同心圆筒组成, 如图 1-5 所示, 两筒的间隙充满油液。外筒与转轴连接, 其半径为 r_2 , 旋转角速度为 ω 。内筒悬挂于一金属丝下, 金属丝上所受的力矩 M 可以通过扭转角的值确定。外筒与内筒底面间隙为 a , 内筒高 H 。试推出油液动力黏

度的计算式。 (答案: $\mu = \frac{M}{\frac{\omega}{a} \pi r_1^2 \left[\frac{1}{2} + \frac{2ar_2H}{r_1^2(r_2 - r_1)} \right]}$)

1-7 如图 1-6 所示, 上下平行两圆盘, 直径均为 d , 间隙为 δ , 其间隙间充满黏度为 μ 的液体。若下盘固定不动, 上盘以角速度 ω 旋转时, 试写出所需力矩 M 的表达式。

(答案: $M = \frac{\pi\mu\omega d^4}{32\delta}$)

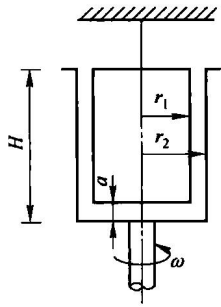


图 1-5 题 1-6 图

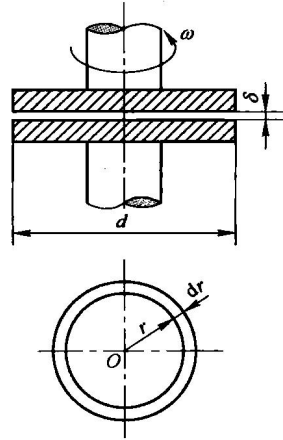


图 1-6 题 1-7 图

第二章 流体静力学

一、基本知识点

本章主要研究流体在外力作用下，保持静止或相对平衡状态时的力学规律。

(一) 静止或相对平衡流体的基本方程

流体平衡微分方程式（欧拉平衡方程）：

$$\left. \begin{aligned} \rho X - \frac{\partial p}{\partial x} &= 0 \\ \rho Y - \frac{\partial p}{\partial y} &= 0 \\ \rho Z - \frac{\partial p}{\partial z} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (2-1)$$

$$dp = \rho(Xdx + Ydy + Zdz) \quad (2-2)$$

式中 p ——流体的压强函数， $p = p(x, y, z)$ ；

X, Y, Z ——流体质点所受的单位质量力；

ρ ——流体密度。

(二) 流体静压强的两个重要特征

(1) 流体静压强的方向沿作用面的内法线方向。

(2) 静止流体任一点处的压强大小与其作用面的方位无关。

(三) 静止流体压强的分布规律

重力场中，液体内某点的位置水头与压强水头之和等于常数，即

$$Z + \frac{p}{\rho g} = \text{const} \quad (2-3)$$

液面压强为 p_0 ，则液深 h 处的压强为：

$$p = p_0 + \rho gh \quad (2-4)$$

(四) 压强的表示方法与单位

1. 压强的表示方法

按量度压强大小的基准（即计算的起点）的不同，压强有以下三种表示方法：

(1) 绝对压强。以毫无气体存在的绝对真空为零点起算的压强，称为绝对压强，以 p' 表示。

(2) 相对压强。以当地同高程的大气压强 p_a 为零点起算的压强，称为相对压强，以 p 表示。

(3) 真空度。当相对压强为负值时，其绝对值称为真空度，以 p_v 表示。

$$p = p' - p_a \quad (2-5)$$

$$p_v = -p = -(p' - p_a) = p_a - p' \quad (2-6)$$

工程上通常只需要计算相对压强或真空度所引起的力学效果。但是当问题涉及流体的状态变化时（如涉及理想气体状态方程、流体压缩特性、汽化特性等情况），则必须采用绝对压强进行计算。工程上所指的表压强为相对压强。

2. 压强单位

(1) 国际单位制：用单位面积上的力表示， $1\text{Pa} = 1\text{N}/\text{m}^2$ 。

(2) 以液柱高度表示：静止液体由于重力作用，在支承面上将产生压力。同一点的压强表示为不同密度的液柱高时，其数值是不同的。常用水柱或水银柱高来表示压强的大小，常用测压管来测量。

测压管是一根玻璃直管或 U 形管，一端连接在需要测定的器壁孔口上，另一端开口，直接和大气相通。

(3) 以标准大气压的倍数表示：

$$1\text{atm}(\text{标准大气压}) = 101325\text{Pa} = 10.33\text{mH}_2\text{O}(\text{水柱}) = 760\text{mmHg}(\text{汞柱})$$

工程上为便于计算，规定：

$$1\text{at}(\text{工程大气压}) = 9.807 \times 10^4\text{Pa} = 10^4\text{mmH}_2\text{O} = 10^4\text{kgf}/\text{m}^2$$

(五) 等压面

等压面是平衡流体中由压强相等的点构成的空间平面或曲面。常见的等压面有自由液面和平衡流体中互不混合的两种流体的分界面。

等压面的两个特点：(1) 等压面即为等势面；(2) 等压面与质量力正交。

等压面是水平面应满足的条件：(1) 静止；(2) 连通；(3) 连通的介质为同一均质流体；(4) 质量力仅有重力。

(六) 液体的相对平衡

液体等加速运动或等角速度旋转运动时，液体和容器之间保持相对静止的状态，称为液体相对平衡状态。自由液面如图 2-1 所示，可以通过流体平衡微分方程解得各种运动状态下的方程（见表 2-1）。

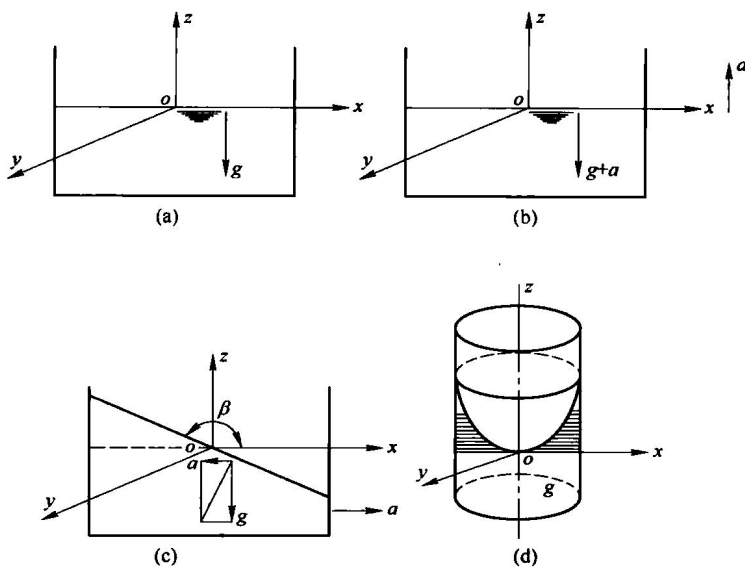


图 2-1 液体静止或相对平衡示意图

(a) 静止; (b) 垂直等加速直线运动; (c) 水平等加速直线运动;
(d) 等角速度旋转运动

表 2-1 液体静止和相对平衡方程对比表

液体状态	静 止	垂直等加速直线运动	水平等加速直线运动	等角速度旋转运动
质量力在各轴向上的分力	$X = 0$ $Y = 0$ $Z = -g$	$X = 0$ $Y = 0$ $Z = -g - a$	$X = -a$ $Y = 0$ $Z = -g$	$X = \omega^2 x$ $Y = \omega^2 y$ $Z = -g$
基本方程式 (p 为相对压强)	$p = -\rho g z$	$p = -\rho(g + a)z$	$p = \rho g \left(-\frac{a}{g} x - z \right)$	$p = \rho g \left(\frac{\omega^2 r^2}{2g} - z \right)$ $p = \rho g \left(\frac{\omega^2 r^2}{2g} - z \right)$
等压面方程	$z = \text{常数}$	$z = \text{常数}$	$z + \frac{a}{g} x = \text{常数}$	$\frac{\omega^2 r^2}{2g} - z = \text{常数}$
自由面方程	$z = 0$	$z = 0$	$z = -\frac{a}{g} x$	$z = \frac{\omega^2 r^2}{2g}$
自由面形状	平面	平面	倾斜面	旋转抛物面
自由面下任一点压强	$p = p_a + \rho g h$ $h = -z$	$p = p_a + \rho(g + a)h$ $h = -z$	$p = p_a + \rho g h$ $h = -\frac{a}{g} x - z$	$p = p_a + \rho g h$ $h = \frac{\omega^2 r^2}{2g} - z$