



高等院校力学教材  
Textbook in Mechanics for Higher Education

# 流体力学基础 (第2版)

Introduction to Fluid Mechanics

王惠民 主编

Wang Huimin



清华大学出版社

 Springer



高等院校力学教材  
Textbook in Mechanics for Higher Education

# 流体力学基础 (第2版)

Introduction to Fluid Mechanics

王惠民 主编

Wang Huimin



清华大学出版社  
北京



Springer

## 内 容 简 介

本书为少学时流体力学教材。全书共7章,包括绪论、流体静力学、流体运动学、流体动力学微分形式的基本方程、恒定平面势流、边界层理论基础、流体动力学积分形式的基本方程,并附有思考题与习题。附录中有矢量及其运算和正交曲线坐标系下的基本方程,可方便读者查阅。

本书可作为高等工科院校土木、水利类专业及其他相关专业的本科生和工程硕士专业学位研究生的流体力学教材,还可供土木、水利、环保、机械、化工、石油、气象等专业有关教学、科研及工程技术人员参考。

版权所有,翻印必究。举报电话:010-62782989 13501256678 13801310933

### 图书在版编目(CIP)数据

流体力学基础/王惠民主编.—2版.—北京:清华大学出版社,2005.9

(高等院校力学教材)

ISBN 7-302-11469-2

I. 流… II. 王… III. 流体力学—高等学校—教材 IV. O35

中国版本图书馆CIP数据核字(2005)第086935号

出版者:清华大学出版社 地 址:北京清华大学学研大厦

<http://www.tup.com.cn> 邮 编:100084

社总机:010-62770175 客户服务:010-62776969

责任编辑:杨倩

印刷者:北京市清华园胶印厂

装订者:北京市密云县京文制本装订厂

发行者:新华书店总店北京发行所

开 本:175×245 印张:10.75 字数:220千字

版 次:2005年9月第2版 2005年9月第1次印刷

书 号:ISBN 7-302-11469-2/O·484

印 数:1~3000

定 价:19.00元

# 前 言

本书自 1991 年 7 月出版以来,主要作为本科生和工程硕士专业学位研究生的流体力学教材,也作为研究生流体力学入学考试的主要参考书。通过十几年的教学实践,不断地修改及完善,已达到修订和再版的要求。

本书在写法上做了新的尝试,主要体现在:(1)将“连续介质模型”的理念贯穿于物理量的定义及微分方程的推导中,做到前后呼应;(2)将“流体静力学”单独设章,做到“流体静力学、流体运动学、流体动力学”体系完整;(3)通过求解二维明渠和圆管的恒定层流精确解,得出流速分布和断面平均流速,进而导出明渠和圆管的沿程水头损失公式,从而将流体力学的二维流动与一维流动有机地结合起来,使篇幅大为减少,且顺理成章;(4)在附录中增加了正交曲线坐标系下的基本方程,方便读者查阅。

参加本书再版编写的有:王惠民(第 1、4、6 章),徐世凯、张淑君(第 2、3 章和附录 B),王泽、吴修锋(第 5、7 章和附录 A),全书由王惠民主编。

本书修订过程中,得到河海大学左东启教授、陈玉璞教授、陈凤兰教授的大力支持与帮助。本书再版过程中,得到清华大学出版社的大力支持与帮助。在此一并感谢。

本书可作为高等工科院校土木、水利类专业及其他相关专业的本科生和工程硕士专业学位研究生的流体力学教材,还可供土木、水利、环保、机械、化工、石油、气象等专业有关教学、科研及工程技术人员参考。

限于编者水平,书中会有不妥之处,敬请批评和指正。

编者

2005 年 3 月

# 第1版序

近年来问世的流体力学、水力学教科书、参考书很多,这是学术发展、出版事业兴旺的表现。这些书籍内容丰富,各有专长,但大多卷帙浩繁,学生不易细读全书、切实消化。现在越来越多的工科专业开设流体力学课程,但学时有限,又不能不讲授各专业所需的专门应用内容,对基本理论部分难以安排足够的篇幅和时间,特别是不少专业加设了流体力学选修课,常感到缺少适宜的教材。本书在这方面填补了空白。

编写这类教材往往遇到一些难以解决的矛盾:既要成一系统,又不能内容庞杂;篇幅很少,又不能浓缩挤压;要简捷通俗,又必须概念严谨。本书妥当地处理了这些问题,选材精当,处处可看出编者曾对若干较经典的流体力学教科书进行过较深的钻研、比较和选择。首先简要讲述了流体的基本特性和研究流体运动的基本理论模型,然后逐步导出流体运动的基本方程,再以实例说明应用求解的方法,循序渐进,不枝不蔓,前后照应,避免重复。

本书重视学生的基本训练,在推出方程后,接着讲述求解的方法。在第三章“积分形式的基本方程”中介绍了“系统”的概念,在第二章和第四章中采用了矢量和张量,帮助读者熟悉更有力的数学表达方式和运算工具。在每章附有大量习题,如果读者按章完成这些练习,将能正确掌握流体力学的基本理论,而为今后进一步深入研究各种专门流体力学打下坚实的基础。

总之,这是一本切合需要的、具有特色的教科书和参考书。

希望这本书能很快地修订再版,进一步提高;也希望能有更多的正确阐述基本理论的简明短小的教材不断出版。

左东启

1990年7月28日

# 第 1 版前言

现有的流体力学教科书大都适用于多学时的教学,对少学时的教学则不便使用。针对这一实际情况,作者曾编写了少学时的流体力学基础讲义,并在两个不同专业使用多次。为了适应当前的教学需要,在上述讲义基础上,经改写而成此书。

本书可作为高等工业院校水利类专业及其他有关专业的少学时(18~36学时)流体力学基础教材,也可作为大专相近专业的教学参考书,还可供水利、土木、环保、机械、化工、石油、气象等专业有关工程技术人员参考。

全书共六章,包括绪论、流体运动学、积分形式的基本方程、微分形式的基本方程、恒定平面势流以及边界层理论初步,并有习题和附录。本书一、二、四章为必学部分,其余三章可根据不同专业,不同讲课学时酌情取舍。

本书编写过程中,得到河海大学左东启教授的悉心指导,陈玉璞教授的热情帮助,以及何定达副教授的大力支持,特此一并致谢。

限于编者水平,书中尚有许多不足之处,缺点和错误在所难免,敬请批评和指正。

王惠民

1990年6月

# 目 录

<b>第 1 章 绪论</b> .....	1
1.1 流体的定义及流体力学的任务 .....	1
1.2 连续介质模型 .....	2
1.3 流体的流动性、粘性与压缩性 .....	3
1.4 流体的分类 .....	5
思考题与习题 .....	6
<b>第 2 章 流体静力学</b> .....	8
2.1 静止流体中一点处的应力状态 .....	8
2.2 流体静压强及其特性 .....	9
2.3 流体静力学基本方程 .....	10
2.4 若干概念 .....	13
2.5 静水压强分布及静水总压力的计算 .....	16
思考题与习题 .....	20
<b>第 3 章 流体运动学</b> .....	26
3.1 两种描述流体运动的方法 .....	26
3.2 流线与迹线 .....	29
3.3 流体运动的基本形式 .....	33
3.4 有旋运动与无旋运动 .....	35
3.5 速度环量与斯托克斯定理 .....	39

思考题与习题 .....	41
<b>第 4 章 流体动力学微分形式的基本方程 .....</b>	<b>44</b>
4.1 连续性方程与流函数 .....	44
4.2 运动微分方程及有关概念 .....	48
4.3 N-S 方程组求解的分析 .....	63
4.4 层流精确解举例 .....	63
4.5 蠕动流方程 .....	69
4.6 雷诺方程 .....	71
4.7 欧拉方程及其积分 .....	77
思考题与习题 .....	81
<b>第 5 章 恒定平面势流 .....</b>	<b>84</b>
5.1 速度势函数 .....	84
5.2 不可压缩流体恒定平面势流 .....	85
5.3 基本的恒定平面势流 .....	85
5.4 势流的叠加 .....	88
5.5 绕圆柱流动 .....	92
思考题与习题 .....	97
<b>第 6 章 边界层理论基础 .....</b>	<b>99</b>
6.1 边界层的概念 .....	99
6.2 边界层的基本特征及边界层厚度 .....	101
6.3 边界层方程 .....	104
6.4 平板边界层的计算 .....	108
6.5 边界层分离与绕流阻力 .....	114
思考题与习题 .....	120
<b>第 7 章 流体动力学积分形式的基本方程 .....</b>	<b>121</b>
7.1 有关概念 .....	121
7.2 推求系统随体导数的公式 .....	123
7.3 连续性方程 .....	125
7.4 动量方程 .....	128
7.5 能量方程 .....	131



---

7.6 水头损失 .....	134
思考题与习题 .....	142
<b>附录 A 矢量及其运算 .....</b>	<b>145</b>
<b>附录 B 正交曲线坐标系下的基本方程 .....</b>	<b>150</b>
<b>参考文献 .....</b>	<b>159</b>

# 第 1 章

## 绪 论

作为流体力学的基础,本章介绍了一些基本概念,包括:流体的定义,流体力学的任务,连续介质模型,流体的流动性、粘性与压缩性等;给出了流体主要物理性质的定义;阐明了流体的四种分类:牛顿流体与非牛顿流体,均质流体与非均质流体,不可压缩流体与可压缩流体,粘性流体与理想流体。本章还强调指出,连续介质模型前提下的物理量定义有别于通常的定义。

### 1.1 流体的定义及流体力学的任务

流体是液体与气体的总称。液体与气体的种类繁多,例如水、油和空气就是常见的流体。流体涉及面很广,流体力学的应用范围也很广。

流体力学作为力学的一个分支,研究在各种力的作用下,流体处于静止和宏观运动状态时的规律以及流体与固体边界间发生相对运动时的相互作用。主要包括:①管道、明渠中的流体运动,例如,管、渠中的水流,输油管中油的运动,排气管中气的运动等。研究流体与管壁、渠壁之间的相互作用问题,计算过流量及壁面阻力等。②物体在流体中的运动以及流体绕过物体的运动,例如,船在水中航行,飞机在天空中飞行,水流绕过桥墩和风绕过建筑物运动等。研究流体与物体之间的相互作用问题,计算阻力和速度等。③水的动力作用,例如,水力冲刷问题,波浪作用问题等。④水力机械,例如,水轮机和水泵等。当然,除运动情形外,还要研究处于静止状态下的流体与

固体边界间的相互作用问题,例如,为水工、港工等建筑物的设计提供水压力载荷。

可见,只要涉及流体运动、流体与固体边界间的相互作用问题,就要以流体力学为基础。正因为如此,流体力学在航空、航海、水利、土木、石油、气象和环保等方面得到了广泛的应用。

## 1.2 连续介质模型

物质是由分子组成的,流体也不例外。分子之间存在间距,且分子不停地作不规则运动。如果我们着眼于研究每个分子的微观运动,并通过它们来研究整个流体的运动,那将是极其复杂、极其困难的。且无此必要,因为流体力学研究流体的宏观运动。

究竟应该怎样研究流体的运动?欧拉(L. Euler)于1753年提出了连续介质模型,从而解决了这一问题。欧拉把微观上由无数分子组成的流体,在宏观上视作由大量流体质点组成的连续介质。流体质点具有宏观充分小、微观充分大的特点。从宏观上看,流体质点的尺度充分小,远远小于所论问题的特征尺度(如圆管直径、明渠水深等),研究流体力学问题时,可忽略流体质点的尺度,从而使问题变得简单;但从微观上看,流体质点的尺度又充分大,远远大于分子间距,流体质点内包含了很多的分子。因此,流体质点的宏观性质,可用其包含的很多分子微观性质的统计平均值来描述。由于流体质点连续分布在给定的流动空间,则流体性质(如密度、压强等)也逐点连续分布在该流动空间。于是,可用连续函数描述流体的运动,用高等数学原理和方法来求解流体力学问题。为了给出连续介质模型下流体密度的定义,在流体内部取一流体单元(简称流体元),流体元是由很多流体质点组成的,其形状可视所论问题而选取,如2.1节四面体形状的流体元及2.3节六面体形状的流体元等,这里选取任意形状的流体元。依据连续介质模型概念,可将流体的密度 $\rho$ 定义为

$$\rho = \lim_{\Delta V \rightarrow V^*} \frac{\Delta m}{\Delta V} \quad (1-1)$$

式中, $\Delta V$ 为流体元的体积; $\Delta m$ 为该流体元的质量; $V^*$ 为流体质点的体积,其在宏观上充分小,但在微观上又充分大,流体质点内包含很多分子。可见式(1-1)所定义的密度 $\rho$ 是有意义的。还应指出,流体力学着眼于研究流体的宏观运动。从宏观角度,可忽略流体质点的体积 $V^*$ ,则式(1-1)可写为

$$\rho = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta m}{\Delta V} = \frac{dm}{dV} \quad (1-2)$$

连续介质模型是流体力学根本性的假定。依据这一假定,可将微观问题化为宏观问题来处理。对一般的流体力学问题,连续介质模型均能成立。然而,对于某些特

殊问题,例如稀薄气体动力学,由于分子间距很大,可与物体的特征长度相比拟,此时连续介质模型已不再适用。

## 1.3 流体的流动性、粘性与压缩性

### 1. 流动性

静止流体在切应力作用下,发生连续变形的特性称为流动性。只要受到切应力作用,无论切应力多么小,静止流体都会连续地变形,即流体的一部分相对另一部分运动,或称为流体运动。而固体静止时仍可承受切应力。因此,流动性是流体与固体的主要区别标志,也是液体和气体被统称为流体的重要依据。

### 2. 粘性与粘度

静止流体不能承受切应力,如果受到切应力作用,流体就会连续变形,表现出流动性;而流体一旦运动,流体内部就具有抵抗剪切变形的特性,以内摩擦形式抗拒流层之间的相对运动,这就是粘性。流体的粘性可通过牛顿(I. Newton)内摩擦定律予以定义(见图 1-1),其表达式为

$$\tau_{yx} = \mu \frac{du}{dy} \quad (1-3)$$

式中, $\tau_{yx}$ 为作用于外法线为 $y$ 方向的平面上、沿 $x$ 方向的切应力; $\frac{du}{dy}$ 为速度梯度,也称角变形率; $\mu$ 为动力粘度,其单位为 $\text{Pa} \cdot \text{s}$ 。满足牛顿内摩擦定律的流体称为牛顿流体;而 $\tau_{yx}$ 与 $\frac{du}{dy}$ 成非线性关系的流体称为非牛顿流体。

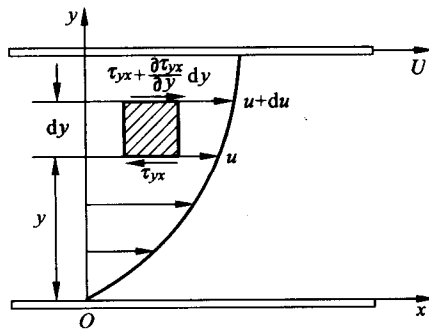


图 1-1

需要指出,动力粘度  $\mu$  是流体的主要物理性质之一,它与流体所处的运动状态无关。实验表明, $\mu$  是温度  $T$  和压强  $p$  的函数。除气压很高的情形外,一般  $p$  的影响很小, $\mu$  主要与温度  $T$  有关。实验进一步表明,液体  $\mu$  值随温度  $T$  的升高而减小;气体  $\mu$  值则随  $T$  的升高而增大。产生这一差别的原因主要是由于液体和气体  $\mu$  的微观起因不同:液体的  $\mu$  主要取决于液体分子间的相互吸引,吸引力越大则  $\mu$  值越大。当温度升高时,液体分子的动量加大,使液体分子间的相互吸引力降低,从而导致液体  $\mu$  值随温度升高而减小;而气体的  $\mu$  主要取决于气体分子间的动量交换,动量交换越激烈则  $\mu$  值越大。当温度升高时,气体分子的运动速度加快,使气体分子间的动量交换更加激烈,从而导致气体  $\mu$  值随  $T$  的升高而增大。此外,温度对液体  $\mu$  值的影响要比气体更为明显。例如,当温度从  $15^\circ\text{C}$  升高到  $50^\circ\text{C}$  时,水的  $\mu$  值约减小  $50\%$ ,而空气的  $\mu$  值仅增大  $9\%$ 。

将动力粘度  $\mu$  与密度  $\rho$  之比定义为运动粘度,因它具有运动学量纲而得名,其表达式为

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (1-4)$$

式中, $\nu$  为运动粘度,单位为  $\text{m}^2/\text{s}$ 。

### 3. 压缩性与体积压缩率

流体不能承受拉力,可以承受压力。流体受到压力作用后体积或密度发生变化的特性称为压缩性。

通常采用体积压缩率  $K_T$  表示流体的压缩性。如图 1-2 所示,当体积为  $V$  的流体受到压强增量  $dp$  作用后,流体体积被压缩变为  $V'$ ,则流体体积的压缩值为  $dV = V' - V < 0$ ,相对压缩值为  $dV/V < 0$ 。为此,将体积压缩率定义为流体体积的相对压缩值与压强增量之比:

$$K_T = -\frac{dV/V}{dp} \quad (1-5)$$

由于  $dV/V$  与  $dp$  符号相反,故上式带有“-”号。 $K_T$  值越大,表示流体越容易压缩。 $K_T$  的单位为  $\text{m}^2/\text{N}$ ,  $dp$  的单位为  $\text{N}/\text{m}^2$ 。

将  $K_T$  的倒数定义为流体的体积模量

$$K = \frac{1}{K_T} = -\frac{dp}{dV/V} \quad (1-6)$$

$K$  值越大,表明流体越不容易压缩。 $K$  的单位为  $\text{Pa}$ 。

不同温度时水的体积模量  $K$  值列于表 1-1。当温度从  $0^\circ\text{C}$  升至  $100^\circ\text{C}$  时,水的  $K$  值变化不大,一般取  $K = 2.1 \times$

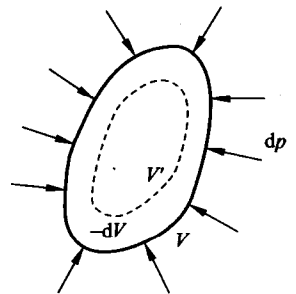


图 1-2

$10^9$  Pa。通常将水作为不可压缩流体来处理,但对于水击等特殊问题则必须考虑水的压缩性;对于气体,通常将其作为可压缩流体来处理。如果压力差较小、运动速度较小、又无很大温度差时,可将气体作为不可压缩流体来处理。压缩将导致流体的体积减小,从而引起流体的密度增大,可见考虑压缩性要比不考虑压缩性复杂。

表 1-1 不同温度时水的主要物理性质数值表

温度/ $^{\circ}\text{C}$	容重 $\rho_g/\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$	密度 $\rho/\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	动力粘度 $\mu/10^{-3}\text{Pa}\cdot\text{s}$	运动粘度 $\nu/10^{-6}\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$	体积模量 $K/10^9\text{Pa}$
0	9.805	999.8	1.781	1.785	2.02
5	9.807	1000.0	1.518	1.519	2.06
10	9.804	999.7	1.307	1.306	2.10
15	9.798	999.1	1.139	1.139	2.15
20	9.789	998.2	1.002	1.003	2.18
25	9.777	997.0	0.890	0.893	2.22
30	9.764	995.7	0.798	0.800	2.25
40	9.730	992.2	0.653	0.658	2.28
50	9.689	988.0	0.547	0.553	2.29
60	9.642	983.2	0.466	0.474	2.28
70	9.589	977.8	0.404	0.413	2.25
80	9.530	971.8	0.354	0.364	2.20
90	9.466	965.3	0.315	0.326	2.14
100	9.399	958.4	0.282	0.294	2.07

## 1.4 流体的分类

根据不同的方式,可对流体进行分类。

(1) 根据切应力  $\tau$  与角变形率  $du/dy$  是否为线性关系分为牛顿流体与非牛顿流体。例如,水、空气、水银等为牛顿流体;胶体、润滑剂、聚合溶液、泥浆等则属于非牛顿流体。

(2) 根据流体的组成为均质流体与非均质流体。例如,单一水流或气流为均质流体;而水和气的混合流体、挟沙水流等则为非均质流体。

(3) 根据压缩性分为不可压缩流体与可压缩流体。气体多属于可压缩流体,但

在一定的条件下,亦可视为不可压缩流体;一般情形下的液体则属于不可压缩流体。

(4) 根据是否考虑流体的粘性分为粘性流体与无粘性流体。粘性流体即实际流体,无粘性流体即理想流体。

## 思考题与习题

1-1 在连续介质模型前提下,写出流体压强的定义式,并说明各量的含义。

1-2 流体质点具有何种特点? 引入“流体质点”的意义是什么?

1-3 从受力角度,阐明流体的流动性、粘性及压缩性。

1-4 试述流体的分类。

1-5 圆管水流流速呈回转抛物面分布,如图 1-3 所示,管轴方向为  $z$  向,半径方向为  $r$  向,水的动力粘度为  $\mu$ 。(1) 写出切应力  $\tau_{rz}$  的表达式;(2) 在流体元  $A, B$  的上、下平面上绘出切应力的方向,并写出切应力的表达式。

1-6 同心圆筒间的液体如图 1-4 所示,已知液体深度  $h=300\text{mm}$ ,内筒外径  $r_1=100\text{mm}$ ,外筒内径  $r_2=105\text{mm}$ ,当外筒不动而内筒转速为  $60\text{r/min}$  时,转矩为  $M=0.12\text{N}\cdot\text{m}$ ,若忽略筒底切应力,试求此种液体的动力粘度  $\mu$ 。

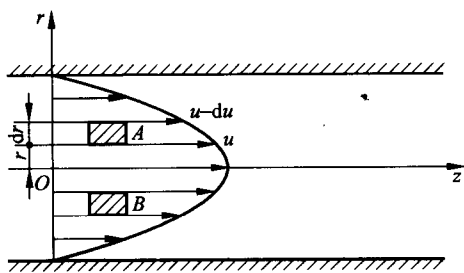


图 1-3

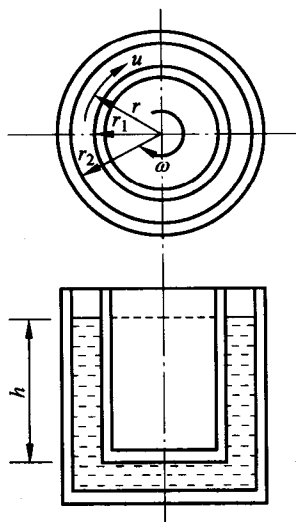


图 1-4

1-7 动力粘度  $\mu=5\times 10^{-2}\text{Pa}\cdot\text{s}$  的粘性流体,其流速分布为  $u=a-C(b-y)^2$ , 式中,  $C$  为待定常数,  $a=100\text{m/s}$ ,  $b=5.0\text{m}$ , 试求切应力分布及最大切应力  $\tau_{\max}$ 。

1-8 已知轴承的轴转速为  $n=1500\text{r/min}$ , 轴承长  $l=40\text{mm}$ , 轴径  $D=30\text{mm}$ , 轴承

径向间隙  $\delta=0.01\text{mm}$ , 润滑油的动力粘度  $\mu=0.06\text{Pa}\cdot\text{s}$ , 试求油粘性引起的力矩  $M$ 。

**1-9** 将绝对压强  $p_1=1.0\text{atm}$ (大气压), 温度  $t_1=20^\circ\text{C}$  的水密封在体积  $V=1.0\text{m}^3$  的高压容器内进行压水试验, 若压水期间容器形状不变、水温不变, 试计算将容器内水压提高到  $p_2=20\text{atm}$  时, 应向容器注入水的体积。

**1-10** 将体积  $V=1000\text{cm}^3$ , 初始压强  $p_1=1.0\times 10^5\text{N/m}^2$  的水加压到  $p_2=2.1\times 10^6\text{N/m}^2$  时, 水的体积减少了  $1.0\text{cm}^3$ , 若容器形状不变, 试求水的体积模量  $K$ 。

**1-11** 某电站引水压力钢管阀门突然关闭, 管中水压强由  $p_1=150\text{N/cm}^2$  剧增至  $p_2=240\text{N/cm}^2$ , 若管中平均水温为  $10^\circ\text{C}$ , 试利用表 1-1 计算水体积的相对压缩值  $dV/V$ 。

**1-12** 充满石油的油库内压强  $p_1=5.0\text{atm}$ , 当从油库放出重为  $392\text{N}$  的石油后, 库内压强降至  $p_2=1.0\text{atm}$ , 已知石油密度  $\rho=880\text{kg/m}^3$ , 石油的体积模量  $K=1.32\times 10^9\text{N/m}^2$ , 试求该油库的总体积。



## 第 2 章

# 流体静力学

本章讨论了静止流体之间、静止流体与固壁之间的相互作用问题。介绍了流体静力学中的一些基本概念,包括:静止流体中一点处的应力状态,流体静压强及其特性,绝对压强与相对压强,负压、真空与真空度等;导出流体静力学基本方程,对流体静力学问题进行了求解;最后,给出静水压强分布,并对作用于平面和曲面上的静水总压力的计算方法进行了分析。

首先介绍流体中的作用力。根据力的作用方式不同,可分为质量力和表面力。质量力作用于每个流体质点且与流体的质量成正比,例如重力和惯性力等。单位质量力是对单位质量流体而言的;表面力则作用于流体表面且与作用面的面积成正比。一般情形下,表面力与作用面成任意角度,因此,可将其分解为法向力和切向力。单位表面力称为应力,包括正应力和切应力。

### 2.1 静止流体中一点处的应力状态

处于静止状态下的流体,无切应力,仅有正应力。为探明这一应力状态,首先在静止流体内部选取四面体形状的流体元,如图 2-1 所示,沿坐标轴的边长分别为  $\Delta x$ ,  $\Delta y$  和  $\Delta z$ 。采用右手直角坐标系并将流体元各面上的正应力沿作用面的外法向标出, $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$  代表特定方向的正应力, $\sigma_n$  代表任意面上的正应力,它与  $x, y, z$  轴的夹