

普通高等院校机械基础课教材

工程流体力学基础

主 编 陈大达 王斌武

副主编 苏文博 翁钲翔 陶广福

西南交通大学出版社

· 成 都 ·

图书在版编目 (C I P) 数据

工程流体力学基础 / 陈大达, 王斌武主编. —成都:
西南交通大学出版社, 2020.1

ISBN 978-7-5643-7359-7

I. ①工... II. ①陈... ②王... III. ①工程力学 - 流
体力学 - 高等学校 - 教材 IV. ①TB126

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2020) 第 013379 号

Gongcheng Liuti Lixue Jichu

工程流体力学基础

主 编 / 陈大达 王斌武

责任编辑 / 刘昕

封面设计 / 何东琳设计工作室

西南交通大学出版社出版发行

(四川省成都市金牛区二环路北一段 111 号西南交通大学创新大厦 21 楼 610031)

发行部电话: 028-87600564 028-87600533

网址: <http://www.xnjdcbs.com>

印刷: 成都中永印务有限责任公司

成品尺寸 185 mm×260 mm

印张 16.25 字数 395 千

版次 2020 年 1 月第 1 版 印次 2020 年 1 月第 1 次

书号 ISBN 978-7-5643-7359-7

定价 48.00 元

课件咨询电话：028-81435775

图书如有印装质量问题 本社负责退换

版权所有 盗版必究 举报电话：028-87600562

前言 II

流体力学是一门研究流体静止与运动的学科，它的应用范围非常广泛，例如在农业水利、交通运输、机械制造、能源环控、气象预测乃至日常生活的各方面，都与流体力学息息相关。20 世纪开始陆续产生的许多高新技术，例如航空航天、高速列车、心肺机、自助呼吸器以及人工心脏都以流体力学与其他工程力学为基础并与相关专业学科结合来实现。

编者从事流体力学的研究与教学工作多年，深感国内外有关流体力学的专著和教科书虽多，其中不乏经典和优秀者，但对于初学者研究流体力学的基础书籍并不多见，有些教材内容过于深奥难懂、缺乏系统性以及未能适当与工程实例、日常生活应用相结合，使得部分学生觉得苦涩难懂，并且还导致不少学生只会盲目使用公式，缺乏对基本观念和流体流动现象的理解。

本书结合教育部首批新工科研究与实践项目、广西本科高校特色专业及实验实训教学基地（中心）建设项目和桂林航天工业学院教育教学改革研究项目等的开展，在广泛借鉴国内外教材编写方法和思路的基础上，利用系统创新理论与项目管理的模块化和简明式方法，将基本概念、基础理论与流体力学在工程技术和日常生活中的应用相结合，采用由浅至深、先易后难的内容编写方式，试图提供一本讲解简练、内容丰富、特色鲜明、方便学习的教材，以适合机械、航空航天、能源环控和水利建筑等不同专业的教师、学生和科学技术人员阅读和参考，同时希望未来能够更进一步将其发展成为反转式课程，藉以强化教学成效和增进学生对教材的吸收性。

本书由桂林航天工业学院教师编写，由陈大达、王斌武任主编，苏文博、翁钲翔、陶广福任副主编。全书由陈大达、王斌武统稿，高琼瑞女士协助整理，并给了很多支持。

由于编者水平有限，疏漏和不妥之处在所难免，不足之处恳请读者批评指正。

编者

2020 年 1 月于桂林航天工业学院

目录 ||

第一部分 基础理论篇

第 1 章 流体力学的基本概念	001
1.1 流体的定义	001
1.2 流体分子间距离的特性	001
1.3 流体力学的定义与分类	002
1.4 流体力学的应用领域	002
1.5 研究流体力学问题的方法	003
1.6 流体性质与速度的描述	005
1.7 流体的特性	017
1.8 流体流动问题的分类	018
1.9 迹线、烟线与流线	023
1.10 沸点温度	027
1.11 空蚀现象	028
1.12 常见单位转换	028
第 2 章 流体静力学	032

2.1	连续性的考虑	032
2.2	静压理论	032
2.3	连通器及其原理	035
2.4	压力的测量	036
2.5	帕斯卡原理	040
2.6	静止流体作用在壁面上的作用力	042
2.7	浮力原理	048
2.8	表面张力	051
2.9	虹吸现象	053
第3章	简单一维流体流动	056
3.1	使用假设	056
3.2	计算公式	059
3.3	文氏流量计	066
3.4	伯努利方程式的简单修正	068
第4章	真实气体的考虑	075
4.1	前言	075
4.2	气流的压缩性	075
4.3	等熵过程	079
4.4	稳态一维不可压缩流的不适用性	084

4.5	伯努利方程式的修正	085
4.6	黏性流的特性	086
4.7	大气的飞行环境	092
第 5 章	超声速空气动力学基础	098
5.1	扰动的传递规律	098
5.2	膨胀波与激波现象	104
5.3	飞机的飞行速度	113
5.4	超声速管流的加减速特性	118

第二部分 理论强化篇

第 6 章	流体流动参数的描述	130
6.1	流体流场与其流动参数的定义	130
6.2	系统与平衡状态的概念	130
6.3	标量与向量的介绍	132
6.4	流体运动情形的描述方法	135
6.5	流体的速度与加速度	136
6.6	圆柱坐标的向量介绍	139
第 7 章	控制体积法	142
7.1	控制体积法的分类与特性	142
7.2	积分控制体积法	143

7.3	微分控制体积法	157
7.4	流线函数与速度势函数	159
第 8 章	平面理想流体的流动	172
8.1	流线函数和速度势函数的基本概念	172
8.2	流线函数和速度势函数的可迭加性	173
8.3	几种基本的平面不可压缩势流	176
8.4	平面不可压缩势流的迭加运算	185
8.5	达朗贝尔悖论	194
8.6	小 结	195
第 9 章	相似理论与因次分析法	198
9.1	产品设计流程	198
9.2	相似理论	199
9.3	因次分析法	204

第三部分 工程应用篇

第 10 章	黏性流体在圆管内的运动	211
10.1	黏性流的基本特性	211
10.2	黏性流体运动的两种形态	212
10.3	雷诺数的定义与计算公式	214
10.4	黏性流体的伯努利方程修正	216

10.5	流体在圆管内的层流运动	218
10.6	完全发展长度	222
10.7	流体在圆管内的湍流运动	223
10.8	圆管内沿程阻力系数的确定	227
10.9	圆管内局部损失系数的确定	230
10.10	压力管路中的水击现象与处理	233
第 11 章	黏性流体的外部流动	235
11.1	边界层的基本概念	235
11.2	边界层转捩现象	238
11.3	层流边界层的微分方程式	239
11.4	平板边界层的近似计算	241
11.5	流体分离的概念	245
11.6	物体运动时形成的阻力	246
参考文献	251

第一部分 基础理论篇

第 1 章 流体力学的基本概念

本章为流体力学课程的基础单元，学习的目的主要是希望通过学习对流体力学的定义与研究方法有初步的了解，并对其研究分类与流体性质有完整的认知，以便在后续阶段能够更高效和更有系统地学习，从而进一步培养系统性创新能力。

1.1 流体的定义

众所周知，物体存在着固体、液体和气体等状态，处于液体和气体两种状态的物质称为流体。也就是说流体是液体和气体的总称，液体的典型代表是水，气体的典型代表是空气。从力学观点来看，流体和固体的主要差别在于它们对剪应力所产生的抵抗能力不同。固体受到剪应力能够产生一定的变形来抵抗剪应力，但是流体不能。流体受到剪应力作用时，不论剪应力多小，都会发生连续性的永久变形，且剪应力撤消后也不会恢复原状。所以流体 (Fluid) 被定义为一种只要受到剪应力 (Shear stress) 就发生连续性与永久性变形的物体，而连续变形的过程称为流动 (Flow)。研究流体流动时，流体内部的性质变化、流动的基本规律以及流体和作用物体间彼此相互影响的一门工程科学，即被称为流体力学 (Fluid mechanics)。

1.2 流体分子间距离的特性

一般而言，固体内部的分子与分子之间距离小于流体情况，因此固体内分子与分子之间的内力会大于流体内分子间的内力。在此依据流体的定义与物体分子间距离表现的特性做一个简单的归纳与比较，让学生对固体与流体之间的差异能够有更进一步的认识，如表 1-1 所示。

表 1-1 固体与流体分子距离特性的比较

	固 体	液 体	气 体
分子间的距离	小	中	大
分子间的内力	强	中	弱
外在形状的改变	体积与形状均不易改变	体积不易改变，形状容易改变	体积与形状均容易改变
承受剪应力的反应	产生弹性或非弹性的剪应变	产生连续且永久性变形，也就是会产生流动	产生连续且永久性变形，也就是会产生流动

1.3 流体力学的定义与分类

流体力学就是研究流体流动时，流体内部的性质变化、运动的基本规律以及流体和作用物体彼此之间相互影响的一门学科。广义而言，但凡一切应用在工程上的学科都属于力学的研究范畴。根据物体受到剪应力产生的反应来分类，力学可分成固体力学与流体力学两大类型。根据固体受到作用力时是否变形，可以将固体力学分成刚体力学与材料力学两种类型。而根据流体的可压缩性，也就是流体流动时密度变化是否可以忽略不计，也可以将流体力学分成可压缩流体力学与不可压缩流体力学两种类型。力学的分类如图 1-1 所示。

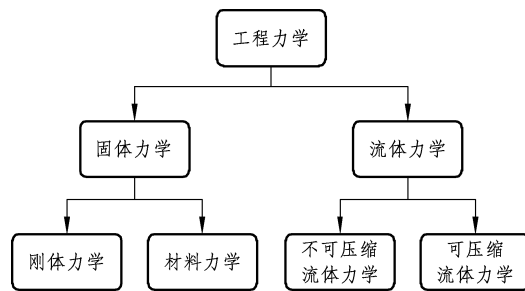


图 1-1 力学的分类

1.4 流体力学的应用领域

如前所述，流体力学研究流体流动时，内部的性质变化、运动的基本规律以及流体和作用物体的相互影响，所以流体力学几乎应用于所有工程。由于灌溉、排水、水库防洪、造船以及各种工业中管道流体运输的需要，工程流体力学，特别是水力学得到高度发展。迅速发展的空气动力学使得航空飞行器与车辆的研制技术突飞猛进，而其与工程热力学、热传学以及燃烧学的相互结合可以应用于改善电动机与发动机的效率、冷冻空调与机械散热等方面。除此之外，机械工业中的润滑、冷却、液压传动以及液压和气动控制问题的解决，也必须应用流体力学的理论。而在冶金工业中，也会遇到像气体在炉内的流动、液态金属在炉内或铸模内的流动、通风以及冷却等流体力学问题。水力发电与风力发电等绿色节能技术的研发则可以应用于环境工程的保护与维持，而大气的预测与天灾的防护则需要大气物理与流体力学的理论结合。随着生物医学技术的普及，药剂的注射及其在血液中的浓度和流动必然应用到流体力学的理论。人工心脏、心肺机、自助呼吸器等的设计都要依据流体力学的基本原理。因此流体力学在工程与科学的应用上可以说是非常普遍的，其应用大概包括了水力与土木工程、交通运输工程、能源工程、环境工程、气象工程、生物医学工程、冶金工业与流体机械工程等领域，如图 1-2 所示。

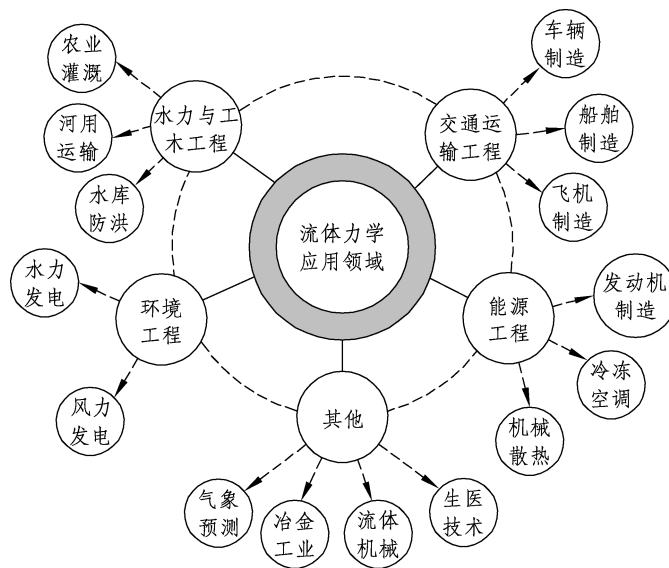


图 1-2 流体力学的应用范畴示意图

1.5 研究流体力学问题的方法

由于流体的运动在一定的空间内进行，其运动的空间被称为流场 (Fluid flow field)，用来表示流体流场状态的物理特性就称为流场的性质 (Property)，例如压力、密度和温度等都是流体流场的性质。用来描述流体运动情况的物理量，例如流场的速度、加速度、动量与动能等，统称为流体的运动参数 (Kinematic parameter)。流体的性质与运动参数又称为流体的流动参数 (Flow parameter)，用来描述流体流动时的流场状态与运动情况。通常在研究流体力学问题时，主要是研究流体在静止或运动时流场的性质或运动参数的变化以及流体运动的基本规律。一般而言，研究流体力学问题的方法大概可以分成理论解析法、实验观测法以及数值计算法。这些方法的特点各不相同，但是又相互联系。

1.5.1 理论解析法

所谓理论解析法 (Theoretical analytic method) 是基于人工应用基本概念、定律和数学工

具来计算简单的流体流动问题，其优点在于理论结果方便分析隐含的物理观念与影响变量的函数关系，但是缺点是对于复杂或包含不规则形状的流体流动问题，无法严密求解，需要透过必要的实验研究来加以验证或修正。在早期计算机不够普及与计算能力有限的情况下，多使用理论解析法配合物理条件的简化来解决简单的流体问题。

1.5.2 实验观测法

所谓实验观测法 (Experimental observation method) 是基于实验的方法来观察或测量流体流动性质或运动参数的变化，以了解流体流动的特性，其中主要手段是利用风洞或水洞进行模型或原型实验。其优点是可提供大量的实验资料，使得研究能从定性或定量的资料中发现与分析流动中的 (新) 现象或 (新) 原理，尤其是实验结果可作为检验其他两种研究方法所得结论是否正确的依据。但是其缺点是成本过高，实验测量往往需要消耗大量的人力、物力、财力。

1.5.3 数值计算法

所谓数值计算法 (Numerical algorithm) 就是利用计算机的快速运算与存储能力强大的特点，结合计算流体力学 (Computational fluid dynamics , CFD) 的数值方法来求解流体流动的问题，由于近年来计算机技术的迅速发展，计算能力日渐强大，因此其被广泛地用于解决复杂的流体流动问题。其优点在于研究费用较少，可以计算复杂的流体流动问题，计算结果也与真实现象之间的偏差较小。但是它的缺点是计算结果为大量数据，不易掌握物理现象。此外数值模拟或仿真程式设计时的错误可能会造成计算时产生严重的数值误差。所以利用数值

计算法得到的计算结果也必须通过必要的实验来加以验证或修正。

1.5.4 综合讨论

为方便学习，这里将简述三种流体力学问题研究方法的特点归纳，如表 1-2 所示。

表 1-2 流体力学问题研究方法的优缺点比较

	理论解析法	实验观测法	数值计算法
研究方式	手工计算	实际观察或测量	计算机运算
主要优点	(1) 有明确方程式。 (2) 计算容易。 (3) 物理观念与影响变量的函数关系清楚，可用于协助解释物理现象	(1) 眼见为实，具有说服力。 (2) 不需要代入假设。 (3) 可以探讨真实现象	(1) 可以计算复杂问题。 (2) 不需要使用太多假设。 (3) 计算机模拟所得的结果与真实现象之间的偏差较少
主要缺点	(1) 只能求解简单问题。 (2) 过多假设容易产生严重的误差使得解析结果可能会和真实现象不同	(1) 需要实验设备。 (2) 必须校正实验精度。 (3) 成本过高	(1) 需要计算机。 (2) 必须修正模拟误差。 (3) 不易掌握物理现象

综上所述，使用理论解析法指导实验研究和数值计算，使它们开展的工作富有成效，少出差错；实验研究用来比较理论分析和数值计算的结果，并检验它们的可用性与正确性，用作提供理论建模和研究流动规律的依据；数值计算可以弥补理论分析和实验研究的不足，对复杂的流体力学问题进行既快又好的计算分析。这三种方法的结合应用，必将进一步促进流体力学的快速发展。

1.6 流体性质与速度的描述

流体力学主要是研究流体在静止或流动时性质变化以及流体流动时对流场内的物体造成的影响，因此在式学习流体力学前必须对流体的性质与速度有一定的认识，才能对后续的

学习内容清楚而完整的认识。一般而言在研究流体力学问题时，主要是探讨气体的压力、温度、密度、速度与黏性。

1.6.1 压力

所谓压力 (Pressure) 是指物体在单位面积上承受正向力的大小，用字母 P 表示。

1. 定义

如图 1-3 所示，物体承受的压力是单位面积上受到的正向力（垂直力），也就是 $P = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta F_N}{\Delta A}$ 。式中， P 是压力， F_N 是垂直（正向）力， A 是面积。

压力的单位可以分为标准单位和非标准单位，标准单位是 N/m^2 或 Pa ，又称为帕斯卡 (Pascal)，非标准单位则是 psi (pound/inch^2) 或 lb/ft^2 (pound/foot^2)。一般而言，在地表的平均大气压力相当于 76 cm 水银柱的压力，其值约为 $1.01325 \times 10^5 \text{ Pa}$ 或 $1.01325 \times 10^5 \text{ N/m}^2$ ，也就是俗称的 1 个标准大气压力。

2. 压力的种类

常用的压力可分为绝对压力与相对压力两种，所谓绝对压力 (Absolute pressure) 是以压力的绝对零值 (绝对真空) 为基准测量出的压力，用 P_{abs} 表示；而相对压力 (Relative pressure) 是以当地的大气压力为基准测量出的压力，又称为表压 (Gage pressure)，用 P_{gage} 或 P_g 表示。绝对压力、大气压力与相对压力之间的关系如图 1-4 所示。

绝对压力与相对压力 (表压) 之间的转换关系为

$$P_{\text{绝对压力}} = P_{\text{大气压力}} + P_{\text{相对压力(表压)}}$$

虽然在航空界对于压力的表示有两种表示方式，但是在流体力学或空气动力学公式中使

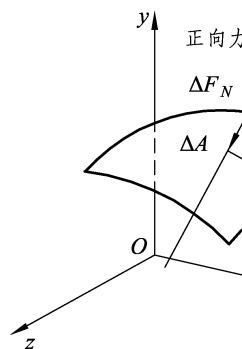


图 1-3 压力的定义

用的压力值，都是绝对压力。所以学生在利用理论解析法与数值计算法研究流体力学或空气动力学的相关问题时，必须先将相对压力（表压）换算成绝对压力。

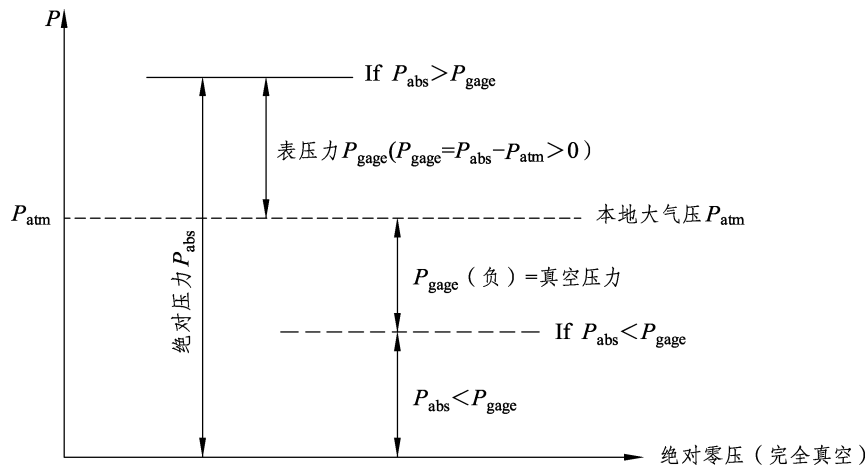


图 1-4 绝对压力与相对压力（表压）之间关系

【例 1-1】

如果大气压力 P_{atm} 为 98 kPa，而压力表读数为 2.25 kPa，试求绝对压力 P_{abs} 。

【解答】

因为 $P_{abs} = P_{atm} + P_g$ ，所以绝对压力 $P_{abs} = 98 + 2.25 = 100.25$ (kPa)。

1.6.2 温度

所谓温度 (Temperature) 是用来表示物体冷热程度的性质参数，用 T 表示。

1. 定义与类型

在流体力学或空气动力学的问题研究中经常使用的温度包括摄氏温度 ($^{\circ}\text{C}$)、华氏温度 ($^{\circ}\text{F}$)、开氏温度 (K) 以及朗氏温度 ($^{\circ}\text{R}$) 这四种。其中前两种为相对温度 (Relative temperature)，后两种为绝对温度 (Absolute temperature)。在流体力学或空气动力学的公式计算中，采用的温度值，必须是绝对温度。所以摄氏温度或华氏温度在代入流体力学或空气动力学的计算公

式中，首先必须先转换成开氏温度或朗氏温度，然后再将开氏温度与朗氏温度分别代入标准单位或非标准单位的计算公式中。

2. 转换公式

摄氏温度（°C）、华氏温度（°F）、开氏温度（K）以及朗氏温度（°R）四种类型的温度可以彼此之间进行转换。

(1) 摄氏温度（°C）与华氏温度（°F）的换算。

$$A\text{ }^{\circ}\text{F} = (9/5 \times B + 32)\text{ }^{\circ}\text{C} \quad (1-1)$$

(2) 摄氏温度（°C）与开氏温度（K）的换算。

$$A\text{ K} = (B + 273.15)\text{ }^{\circ}\text{C} \quad (1-2)$$

(3) 华氏温度（°F）与朗氏温度（°R）的换算。

$$A\text{ }^{\circ}\text{R} = (B + 459.67)\text{ }^{\circ}\text{F} \quad (1-3)$$

【例 1-2】

若大气温度为 25 °C，试转换为华氏温度（°F）、开氏温度（K）以及朗氏温度（°R）。

【解答】

(1) 按照公式 (1-1)，所以 $\frac{9}{5} \times 25 + 32 = 77$ (°F)

(2) 按照公式 (1-2)，所以 $25 + 273.15 = 298.15$ (K)

(3) 按照公式 (1-3)，所以 $77 + 459.67 = 606.67$ (°R)

1.6.3 密 度

所谓流体的密度是指每单位体积内包含流体的质量，用 ρ 表示。其公式定义为

$$\rho = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta m}{\Delta V}$$

式中， ρ 是流体的密度， m 是流体的质量，而 V 是流体占据的体积。对于空间各点密度相同的流体而言，流体密度的计算公式可简化为 $\rho = \frac{m}{V}$ 。水的密度可视为 $1\,000\text{ kg/m}^3$ ，在地表上的平均大气密度约为 1.225 kg/m^3 。通常在研究流体力学问题时，可将流体的密度视为常数，但是大气密度的值会随着高度的上升而变小，这是因为随着高度的上升，空气会越来越稀薄的缘故。除此之外，根据实验与研究发现，气体的密度会随着气体所处环境的压力、温度与速度的不同而有所改变。

1.6.4 比容、比重力与比重

在研究流体力学问题时，有很多时候是用其他形式来表示流体的密度，学生必须掌握其与流体密度的转换关系，才能进一步研究流体力学。

1. 比 容

所谓比容 (Specific volume) 是指单位质量中流体占据的体积，用符号 ν 表示。其公式定义为

$$\nu = \frac{V}{m}$$

式中， ν 是流体的比容， V 是流体占据的体积，而 m 是流体的质量。显然，流体的比容 ν 为流体的密度 ρ 的倒数，并可表示为 $\nu = \frac{1}{\rho}$ 。

2. 比重力

比重力 (Specific weight) 是指单位体积中流体所受的重力，用符号 γ 表示。其公式定义为

$$\gamma = \rho g$$

式中， γ 是流体的比重量， ρ 是流体的密度，而 g 为重力加速度，通常水在一个大气压、

4 °C 的情况下，比重为 9 810 N/m³。

3 . 比 重

比重 (Specific gravity) 是指流体的密度与水在 4 °C 时密度的比值，用符号 S 表示。其公式定义为

$$S = \frac{\rho}{\rho_{\text{water}4\text{ }^{\circ}\text{C}}} = \frac{\gamma}{\gamma_{\text{water}4\text{ }^{\circ}\text{C}}}$$

式中， S 是流体的比重， ρ 与 $\rho_{\text{water}4\text{ }^{\circ}\text{C}}$ 分别是流体的密度以及在一个大气压与 4 °C 的情况下水的密度， γ 与 $\gamma_{\text{water}4\text{ }^{\circ}\text{C}}$ 分别是流体的比重力以及在一个大气压与 4 °C 的情况下水的比重力。根据实验与研究的结果，如果液体的比重 S 小于 1.0，也就是 $S < 1.0$ ，则液体会漂浮在水上，这也是油为什么会漂浮在水上的原理。

4 . 彼此的关系与转换

(1) 流体质量与流体密度之间的关系。根据流体密度 ρ 的计算公式 $\rho = \frac{m}{V}$ ，可以得出流体质量与流体密度之间的转换公式为

$$m = \rho \times V$$

式中， m 是流体的质量， ρ 是流体的密度， V 是流体占据的体积，也就是流体的质量等于流体密度与流体体积的乘积。

(2) 流体比容与流体密度之间的关系。根据流体比容 v 与流体密度 ρ 的定义公式 $v = \frac{V}{m}$ 与 $\rho = \frac{m}{V}$ ，可以推出流体比容 v 与流体密度 ρ 转换公式为

$$v = \frac{1}{\rho}$$

也就是流体比容 v 为流体密度 ρ 的倒数。

(3) 流体比重力与流体密度之间的关系。根据流体比重力 γ 的定义公式 $\gamma = \rho g$ ，可以推得

$$\rho = \gamma / g$$

也就是流体的密度 ρ 等于流体比重力 γ 除以重力加速度 g 。

(4) 流体比重与流体密度之间的关系。根据流体比重 S 的定义，可以推得

$$\rho = S \times \rho_{\text{water } 4^{\circ}\text{C}}$$

也就是流体的密度 ρ 等于流体比重 S 与水的密度 $\rho_{\text{water } 4^{\circ}\text{C}}$ 乘积。

【例 1-3】

如果液体的体积为 3 m^3 ，质量为 2850 kg ，试求 (1) 密度 ρ ；(2) 比重力 γ ；(3) 比重 S ，并判定该液体置于水中是否会浮在水面。

【解答】

(1) 根据流体密度 ρ 的定义，所以 $\rho = \frac{m}{V} = \frac{2850 \text{ kg}}{3 \text{ m}^3} = 950 \text{ kg/m}^3$ 。

根据流体比重力 γ 的定义，所以 $\gamma = \rho g = 950 \text{ kg/m}^3 \times 9.81 \text{ m/s}^2 = 9319.5 \text{ N/m}^3$ 。

根据流体比重 S 的定义，所以 $S = \frac{\rho}{\rho_{\text{Water } 4^{\circ}\text{C}}} = \frac{950 \text{ kg/m}^3}{1000 \text{ kg/m}^3} = 0.95$ 。

(2) 因为液体的比重 < 1.0 ，所以该液体如果置于水中时将会浮在水面上。

1.6.5 速度

速度 (Velocity) 是用来衡量物体运动或流体流动快慢程度的参数，在航空航天领域多用马赫数来表示物体运动或气体流动的速度，例如在研究飞机飞行问题时就经常以马赫数的形式来表示飞机的飞行速度。马赫数 (Mach number) 是物体的运动速度或气体流动的速度对声 (音) 速的比值，用符号 Ma 表示。其公式定义为

$$Ma = \frac{V}{a}$$

式中, Ma 是马赫数, V 是物体的运动速度或是气体流动的速度, a 为声速。实验证明液体的密度受温度或压力的影响并不显著, 因此通常会把液体的密度视为常数。而对于低速流动的气体而言, 也就是气体的流动速度低于 0.3 马赫 (Ma) 时, 通常可以将气体的密度变化忽略不计, 但是对于高速流动的气体, 也就是气体的流动速度高于 0.3 马赫 (Ma) 时, 则必须考虑气体的密度变化。除此之外, 如果气体流场的局部流速高于声速时, 也就是气体流场的局部马赫数大于或等于 1.0 时, 还必须探讨激波对气体性质造成的影响。通常在地表上大气的平均声速值约为 340 m/s, 在离地 10 km 高度也就是大型民航客机的平均巡航高度时, 大气的平均声速值约为 300 m/s, 由此可知对流层内大气的声速值会随着离地表高度的增加而逐渐减少。

【例 1-4】

如果一架飞机的飞行速度为 150 m/s, 声速为 300 m/s, 请问飞机的飞行马赫数是多少?

【解答】

根据马赫数的定义, 飞机的飞行马赫数为 $Ma = \frac{150 \text{ m/s}}{300 \text{ m/s}} = 0.5$ 。

1.6.6 质量流率与体积流率

在研究流体力学问题时，通常会使用质量流率来计算流经管道截面面积密度与速度的变化情形，并进而求出流体流场的压力变化。对于液体或低速流动的气体，通常会使用体积流率来计算流经管道截面面积速度的变化情形，从而求出流体流场的压力变化。

1. 质量流率的概念

质量流率 (Mass flow rate) 是指流体在单位时间内流经管道截面面积的质量，用符号 \dot{m} 表示。其计算公式为 $\dot{m} = \rho AV$ ，式中， \dot{m} 指流体的质量流率， ρ 指流体的密度， A 指流体流经管道的截面面积， V 指流体的平均流速。常有人将质量流率简称为质流率。

2. 体积流率的概念

体积流率 (Volume flow rate) 是指流体在单位时间内流经管道截面面积的体积，用符号 \dot{Q} 表示。其计算公式为 $\dot{Q} = AV$ ，式中， \dot{Q} 指流体的体积流率， A 指流体流经管道的截面面积以及 V 指流体的平均流速。常有人将体积流率简称为体流率。

3. 两者之间的关系

对于液体与流动速度低于 0.3 马赫 (Ma) 的低速气体，由于流体的密度变化可以忽略不计，也就是将流体的密度视为常数，因此流经同一管道截面面积的质量流率与体积流率之间的关系可以用 $\dot{m} = \rho AV = \rho \dot{Q}$ 的关系式来表示，也就是在流体的密度变化可以忽略不计的情况下，质量流率 \dot{m} 等于流体密度 ρ 与体积流率 \dot{Q} 两者的乘积。

1.6.7 黏 性

由于流体分子与分子之间彼此具有吸引力，流体在流动或物体在流场运动时，流体会产生一个阻滞流体流动或物体在流体中运动的力，这一特有属性，称为流体的黏性，它是流体的固有特性。

1. 流体的黏滞系数

在研究流体力学问题时，如果要讨论流体黏性，就必须讨论流体的黏滞系数，而流体的黏滞系数可以分成流体的动力黏滞系数与流体的运动黏滞系数。

(1) 动力黏滞系数。根据牛顿黏性定律 $\tau = \mu \frac{du}{dy}$ ，式中， τ 为流体承受的剪应力， $\frac{du}{dy}$ 为流体的速度梯度，而 μ 即为流体的动力黏滞系数 (Dynamic viscosity coefficient)，又称为流体的动力黏度 (Dynamic viscosity)，简称为黏度。流体动力黏滞系数的单位为 Pa·s，由于黏度单位也常用泊 (poise) 为单位，用缩写符号 P 表示，且习惯用百分之一的量度，又由于 $1 \text{ poise} = 10^{-1} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ ，所以 $1 \text{ cP (centi Poise)} = 10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ 。

(2) 运动黏滞系数。因为流体的黏性对流体流动或物体在流场内运动的影响通常与流体的密度 ρ 有关，所以在研究流体力学问题时常需引入运动黏滞系数的概念。流体的运动黏滞系数可用公式 $\nu = \frac{\mu}{\rho}$ 表示。式中， μ 为流体的动力黏滞系数， ρ 为流体密度， ν 即为流体的运动黏滞系数 (Kinematic viscosity coefficient)，简称为流体的运动黏度 (kinematic viscosity)，其单位用 $1 \text{ m}^2/\text{s}$ 或 cSt (centi Stoke) 表示，而 $1 \text{ cSt} = 1 \text{ mm}^2/\text{s}$ 。

2. 牛顿流体的概念

如果必须讨论流体的黏性问题时，通常会将黏性流体视为牛顿流体。所谓牛顿流体 (Newtonian fluid) 是指在定温以及定压的情况下，剪应力与流体的速度梯度成正比的流体，也即满足前面说明的牛顿黏性定律 (Newton law of viscosity) $\tau = \mu \frac{du}{dy}$ 的流体。除非特别说明或有特殊需求，大家通常都会将流体视为牛顿流体来处理黏性流动问题。

3. 无滑流现象

流体具有黏性，因此其流经物体表面时，流体分子与物体接触表面会因为彼此的相互作用，在接触的物体表面达到动量平衡，物体表面接触的流体速度会和接触物体表面的速度相同，这一现象即称为无滑流条件 (No-slipping condition)。同理，接触物体表面能达到能量的平衡，因而和物体表面接触的流体温度会和接触物体表面的温度相同，这一现象即称为无温度跳动条件 (No temperature jump condition)。在流体力学的问题研究中，无滑流条件与无温度跳动条件主要作为决定黏性流体在接触物体表面时速度与温度的判定原则。

【例 1-5】

请问飞机在静止时会有黏性作用的产生吗？

【解答】

所谓流体的黏性是指流体在流动或是物体在流场运动时，流体会产生一个阻滞流体流动或物体在流体中运动的力，静止的飞机因为没有运动，所以黏性作用不会产生。

【例 1-6】

假设流体流场的速度分布如图 1-5 所示，试求与固定平板接触的流体速度 $u(0)$ 。

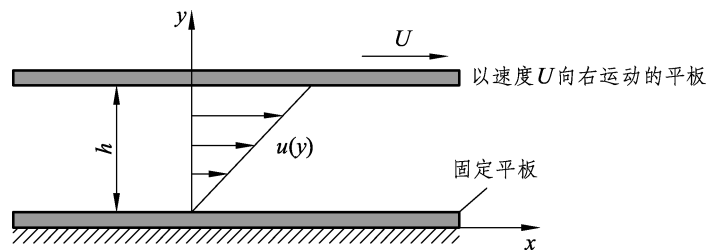


图 1-5 沿平板流动 (1)

【解答】

根据无滑流现象，因为和物体表面接触的流体速度会和接触物体表面的速度相同，所以与固定平板接触的流体速度 $u(0) = 0$ 。

【例 1-7】

假设流体流场的速度分布如图 1-6 所示且两平行平板相距非常近，试求流体流场的速度分布 $u(y)$ 。

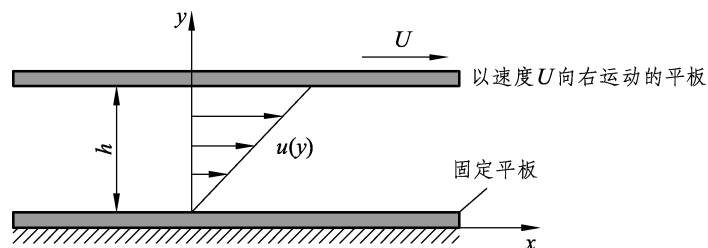


图 1-6 沿平板流动 (2)

【解答】

(1) 根据无滑流现象, 因为和物体表面接触的流体速度会和接触物体表面的速度相同, 所以流体速度 $u(0)$ 与 $u(h)$ 分别为 $u(0) = 0$ 与 $u(h) = U$ 。

(2) 当两平行平板相距非常近时, 可以假设黏性流体在两平行平板之间的速度呈线性分布, 也就是假设流体流场的速度梯度 $\frac{du}{dy}$ 为一常数。因此可设流体流场的速度分布公式为 $u(y) = ay + b$, 式中 a 与 b 为常数值。

(3) 因为 $u(0) = 0$, 所以可以推得 b 值为 0。

(4) 因为 b 值为 0, 且 $u(h) = U$, 所以 $u(h) = ah + b = ah = U$, 可以推得 $a = \frac{U}{h}$ 。

(5) 将 $a = \frac{U}{h}$ 与 $b = 0$ 代入流体流场的速度分布公式 $u(y) = ay + b$ 中可得在两平行平板之间的速度分布为 $u(y) = \frac{U}{h}y$ 。

【例 1-8】

如图 1-7 所示, 气缸的内径 $D = 152.6 \text{ mm}$, 活塞的直径 $d = 152.4 \text{ mm}$ 、长 $L = 304.8 \text{ mm}$, 已知润滑油的运动黏度 $\nu = 9.144 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$, 密度 $\rho = 920 \text{ kg}/\text{m}^3$, 活塞的运动速度 $U = 6 \text{ m/s}$, 试求克服摩擦阻力所需消耗的功率。

【解答】

(1) 从题目可知,

① 气缸壁与活塞之间的间隙 δ 为 $\delta = \frac{D-d}{2}$ 。

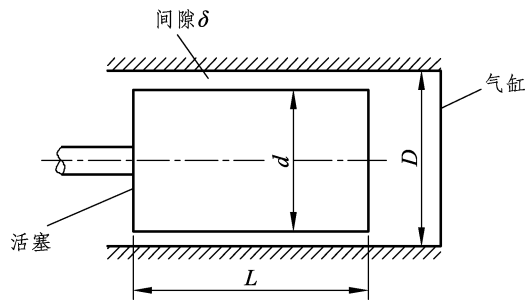


图 1-7 气缸活塞运动

② 活塞的表面面积 $A = \pi dL$ 。

③ 由于附着在气缸上的润滑油速度为零，附着在活塞上的润滑油速度为 $U = 6 \text{ m/s}$ ，而气缸壁的间隙 δ 很小，所以可假设油层内的速度呈线性分布，可推得 $\frac{du}{dy} = \frac{U}{\delta}$ 。

(2) 因为作用在活塞上的摩擦阻力 $F_{\text{Dr}} = \tau A = \mu \frac{du}{dy} A = \mu \frac{U}{\delta} A = \rho \nu \frac{U}{\delta} A$ ，因此可求得其值为 $F_{\text{Dr}} = \rho \nu \frac{U}{\delta} A = 920 \times 9.144 \times 10^{-5} \times \frac{6 \times \pi \times 152.4 \times 10^{-3} \times 304.8 \times 10^{-3}}{(152.6 - 152.4) \times 10^{-3} / 2} = 736.6 \text{ (N)}$ 。

(3) 因为克服摩擦阻力所需消耗的功率 $P = F_{\text{Dr}} \times U$ 因此可求得其值为 $P = F_{\text{Dr}} \times U = 736.6 \times 6 = 4420 \text{ (W)} = 4.42 \text{ (kW)}$ 。

【例 1-9】

如图 1-8 所示，有一滑动轴承，轴的直径 $d = 120 \text{ mm}$ ，轴承长度 $L = 200 \text{ mm}$ ，间隙 $\delta = 1 \text{ mm}$ ，其中充满黏度 $\mu = 0.54 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 的润滑油，轴承以转速 $n = 200 \text{ r/min}$ 运转，试求轴承转动时摩擦力与转动时所需功率 P 。

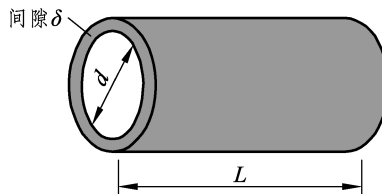


图 1-8 滑动轴承示意图

【解答】

(1) 由题可知, 轴承转动 $U = \frac{\pi dn}{60}$, 滑动轴承内油层的速度分布 $\frac{du}{dy} = \frac{U}{\delta}$ 。

(2) 轴承转动时摩擦力 $F_{\text{Dr}} = \mu \frac{U}{\delta} A = 5.118 \text{ (N)}$, 而所需的功率 $P = F_{\text{Dr}} \times U = 6.43 \text{ (W)}$ 。