



普通高等教育“十二五”规划教材

# 工程流体力学 (第二版)

于 萍 主编



科学出版社

普通高等教育“十二五”规划教材

# 工程流体力学

(第二版)

于 萍 主编

科学出版社

北 京

## 内 容 简 介

本书是根据机械、动力类专业 40~50 学时的工程流体力学课程教学要求组织编写的。全书除绪论外共分 7 章:流体的主要物理性质、流体静力学、流体动力学基础、流体在圆管中的流动、孔口出流、缝隙流动和可压缩气体的一元流动。各章后配有思考与练习题,并附有参考答案,方便学生自测和复习。

本书可作为机械类及近机械类各专业本科生及专科生工程流体力学课程教材,也可供相关技术人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

---

工程流体力学/于萍主编. —2 版. —北京:科学出版社,2015.2  
普通高等教育“十二五”规划教材  
ISBN 978-7-03-043118-9

I. ①工… II. ①于… 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(2015)第 016717 号

---

责任编辑:朱晓颖 / 责任校对:郭瑞芝  
责任印制:霍 兵 / 封面设计:迷底书装

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号  
邮政编码:100717  
<http://www.sciencep.com>

文林印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2008 年 9 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2015 年 2 月第 二 版 印张:13

2015 年 2 月第六次印刷 字数:332 000

定价:32.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

## 前 言

本书是根据机械、动力类各专业工程流体力学课程的教学要求,参考教育部流体力学课程教学指导小组制定的《工程流体力学课程教学基本要求》,及 2006 年四川流体力学会议上的《流体力学水力学资源库框架》编写而成的。全书除绪论外共分 7 章。从绪论到第 3 章为流体力学的基础理论,第 4~7 章为流体力学在各方面的应用。各章之间具有相对的独立性,学校可根据各自的教学要求组合成不同形式的教学模块。

科学技术的不断发展,对工程流体力学的教学内容和教学方法提出了更高的要求。本着以培养面向 21 世纪创新人才为宗旨,以“基于研究的教学”和“大学生自主学习”的理念为导向,要求构建以培养学生创新能力为核心的新课程体系。在编写教材时,我们力求加强基础、强调应用,在介绍基础理论的同时,大量介绍工程应用问题。

本书以吉林大学机械学院流体力学教研室的教师为主要编写队伍,河北科技大学任欧旭老师也参与了部分章节的编写。全书根据编者多年的教学经验和教学实践编写而成,经多次讨论和修改,最终成稿。参加本书编写的有:吉林大学赵晓影(绪论、第 1 章)、王辉(第 3 章)、于萍(第 4 章 6~7 节)、沙永柏(第 5 章)、张萃(第 6 章)、朱黎辉(第 7 章),河北科技大学任欧旭(第 2 章、第 4 章 1~5 节)。本书由于萍担任主编,并完成全书的修改和统稿工作。

本次再版对全书重新作了修订,对已发现的问题及疏漏均加以改正,但由于作者水平有限,仍有可能存在差错,恳请读者批评、指正。

编 者

2014 年 11 月

# 目 录

## 前言

绪论	1
<b>第 1 章 流体的主要物理性质</b>	<b>3</b>
1.1 连续介质概论	3
1.2 流体的密度和相对密度	4
1.3 流体的黏性	5
1.3.1 黏性产生的原因	5
1.3.2 牛顿内摩擦定律	5
1.3.3 流体的黏度	6
1.3.4 理想流体	8
1.4 流体的膨胀性和压缩性	10
1.4.1 体胀系数	10
1.4.2 压缩系数和体积弹性系数	10
1.4.3 不可压缩流体的概念	11
本章小结	12
思考与练习	12
<b>第 2 章 流体静力学</b>	<b>15</b>
2.1 作用在流体上的力	15
2.1.1 质量力	15
2.1.2 表面力	16
2.1.3 流体静压强	16
2.2 流体平衡微分方程	17
2.2.1 流体平衡微分方程的导出	17
2.2.2 质量力的势函数	18
2.2.3 等压面	19
2.3 重力场中的平衡流体	20
2.3.1 不可压缩流体的静压强基本公式	20
2.3.2 可压缩流体的静压强分布公式	22
2.4 静压强的计算与测量	23
2.4.1 静压强的计算单位	23
2.4.2 静压强的计算标准	24
2.4.3 静压强的测量	24
2.5 平衡流体对壁面的作用力	27
2.5.1 作用在倾斜平面上的总压力	28

2.5.2	作用在曲面上的总压力	31
2.5.3	作用在沉没物体上的总压力	35
2.6	流体在非惯性坐标系中的相对平衡	35
2.6.1	等加速水平直线运动容器中液体的相对平衡	36
2.6.2	等角速度旋转容器中液体的相对平衡	36
	本章小结	38
	思考与练习	39
<b>第3章</b>	<b>流体动力学基础</b>	45
3.1	研究流体流动的方法	45
3.1.1	拉格朗日法	45
3.1.2	欧拉法	46
3.2	流动的分类	47
3.2.1	定常流动和非定常流动	47
3.2.2	一维流动、二维流动和三维流动	48
3.2.3	均匀流和非均匀流	48
3.2.4	缓变流和急变流	49
3.3	用欧拉法描述流体运动的基本概念	49
3.3.1	流线	49
3.3.2	流管、流束、有效断面	50
3.3.3	流量	51
3.3.4	平均流速	51
3.4	系统与控制体	51
3.5	连续方程	53
3.6	实际流体的运动微分方程(纳维-斯托克斯方程)	54
3.7	能量方程	58
3.8	伯努利方程及其应用	60
3.8.1	伯努利方程的几何意义及物理意义	60
3.8.2	伯努利方程在工程实际中的应用	61
3.9	沿流线主法线方向压强和速度的变化	63
3.10	黏性流体总流的伯努利方程	64
3.11	动量方程与动量矩方程	66
3.11.1	惯性坐标系中的动量方程与动量矩方程	66
3.11.2	定常管流的动量方程	66
3.11.3	动量方程的应用	67
3.12	旋流、势流及涡	74
3.12.1	流体质点的变形与旋转运动	74
3.12.2	旋流、势流及涡的概念	76
3.13	点涡速度场的规律及其应用	77
3.13.1	点涡速度场的概念和模型	77
3.13.2	无旋流动的能量方程	78

3.13.3 圆周运动的压强与速度的关系 .....	79
3.13.4 点涡速度场的规律 .....	80
3.13.5 涡核内外部流场静压头及总水头 .....	80
3.13.6 旋风分离器压强损失的分析 .....	82
3.14 涡轮机械基本方程 .....	83
本章小结 .....	85
思考与练习 .....	85
<b>第4章 流体在圆管中的流动</b> .....	<b>91</b>
4.1 雷诺实验 .....	91
4.1.1 层流和湍流 .....	92
4.1.2 流动状态的判定 .....	92
4.1.3 沿程损失与速度的关系 .....	93
4.1.4 水力直径的概念 .....	94
4.2 圆管中的层流流动 .....	95
4.2.1 流速分布和流量 .....	95
4.2.2 平均流速和最大流速 .....	97
4.2.3 层流的动能和动量修正系数 .....	97
4.2.4 层流的沿程损失 .....	97
4.2.5 管路进口起始段 .....	99
4.3 圆管中的湍流流动 .....	99
4.3.1 时均流动与脉动 .....	101
4.3.2 混合长度理论 .....	102
4.3.3 湍流的速度分布 .....	105
4.4 管路流动的沿程阻力 .....	107
4.4.1 尼古拉兹实验 .....	108
4.4.2 莫迪图 .....	111
4.5 管路流动的局部阻力 .....	115
4.5.1 局部损失产生的原因 .....	115
4.5.2 管路突然扩大的局部阻力 .....	116
4.5.3 几种常用的局部阻力系数 .....	116
4.5.4 局部损失一般表达式 .....	120
4.5.5 局部阻力的相互干扰 .....	120
4.6 管路计算 .....	121
4.6.1 简单管路 .....	122
4.6.2 串联管路 .....	123
4.6.3 并联管路 .....	124
4.6.4 管路特性 .....	126
4.7 水击现象 .....	128
4.7.1 水击的物理过程 .....	128
4.7.2 水击压强和水击波的传播速度 .....	130

4.7.3 防止水击危害的措施 .....	132
本章小结 .....	132
思考与练习 .....	133
<b>第5章 孔口出流与相似原理</b> .....	141
5.1 孔口出流概述 .....	141
5.1.1 薄壁孔口和厚壁孔口 .....	141
5.1.2 自由出流和淹没出流 .....	142
5.1.3 完善收缩和不完善收缩 .....	142
5.1.4 恒定出流和非恒定出流 .....	143
5.2 薄壁孔口恒定出流 .....	143
5.2.1 薄壁孔口出流的速度和流量计算 .....	143
5.2.2 孔口出流系数 .....	145
5.3 厚壁孔口恒定出流 .....	145
5.3.1 厚壁孔口出流的速度和流量 .....	146
5.3.2 孔口出流系数 .....	146
5.3.3 不同孔口出流系数 .....	148
5.4 机械中的气穴现象 .....	150
5.4.1 气穴与气蚀 .....	150
5.4.2 节流气穴 .....	151
5.4.3 泵进口处的气穴 .....	152
5.5 相似原理 .....	152
5.5.1 流体的力学相似 .....	153
5.5.2 动力相似准则 .....	154
5.5.3 近似模型法 .....	157
本章小结 .....	161
思考与练习 .....	161
<b>第6章 缝隙流动</b> .....	165
6.1 平行平面缝隙 .....	165
6.1.1 速度分布规律与流量 .....	165
6.1.2 切应力与摩擦力 .....	166
6.1.3 功率损失与最佳缝隙 .....	167
6.2 环形缝隙 .....	167
6.2.1 同心环形缝隙 .....	167
6.2.2 偏心环形缝隙 .....	168
6.3 平行圆盘缝隙 .....	169
6.3.1 放射流动 .....	169
6.3.2 挤压流动 .....	170
6.4 倾斜平面间的缝隙流动 .....	171
6.4.1 缝隙间的速度分布 .....	171
6.4.2 压强分布与流量 .....	172



---

6.4.3 柱塞运动中的卡紧力 .....	173
6.4.4 动压支撑的支撑力 .....	174
本章小结 .....	176
思考与练习 .....	176
<b>第7章 可压缩气体的一元流动</b> .....	<b>180</b>
7.1 声速和马赫数 .....	180
7.1.1 声速 .....	180
7.1.2 马赫数 .....	182
7.2 可压缩气体一元流动的基本方程 .....	184
7.2.1 可压缩性气体总流的连续性方程 .....	184
7.2.2 可压缩性气体的能量方程 .....	185
7.2.3 可压缩性气体的运动方程 .....	186
7.3 一元气体的流动特性 .....	186
7.3.1 滞止状态和滞止参数 .....	186
7.3.2 最大速度状态 .....	188
7.3.3 临界状态和临界参数 .....	188
7.4 气体在半截面管(喷管)中的流动 .....	189
7.4.1 马赫数和截面面积的关系 .....	190
7.4.2 渐缩喷管和拉瓦尔喷管 .....	191
本章小结 .....	195
思考与练习 .....	195
<b>参考文献</b> .....	<b>198</b>

# 绪 论

## 1. 流体力学的研究内容及应用

在自然界中,物质的常见形式有三种,即固体、液体和气体,其中液体和气体都属于流体。从力学角度来分析,流体与固体的主要差别是抵抗外力的能力不同。固体能够抵抗一定强度的拉力、压力及剪切力;流体承受的力主要为压力,它不能抵抗拉力,静止的流体不能抵抗剪切力。如果对流体施加剪切力,它就会产生连续变形,这是流体区别于固体的根本标志。这种受任何微小剪切力都会产生连续变形(流动)的物质称为流体。在日常生活中,经常会接触到许多流体,如水、空气、酒精、油等。很多时候人们需要掌握流体的运动规律,从而解决各种问题。

流体力学是力学的一个分支,是一门主要研究流体平衡和运动规律及其应用的学科。例如,静止的流体对周围固态物质的静压力,运动的流体对处于其中的其他物体产生的作用力等,这些都属于流体力学的研究范畴。

流体力学对于工科各专业来说,属于技术基础课,它的任务是为学生学习后继课程及从事专业工作奠定初步的流体力学理论基础。由于大量工程及设备中都要用到流体,与流体相关的实际问题的解决又要用到流体力学的相关知识,因此本门课程有着广泛的应用价值,它属于一门应用学科。

在人们日常生活及工程领域中随处可见流体及流体的力学现象,如水的流动、大气的运动、风速的高低;供水及排水系统、供暖系统、制冷系统、发电系统;石油、天然气的开采,地下水的开发利用;气体的燃烧、爆炸;血液在血管中的流动,机体中的生理流体运动和植物中营养液的输送;鸟类在空中的飞翔,动物在水中的游动;机械制造、航空航天、冶金采矿、水利水电、土建环保、石油化工、军工核能等行业都存在许多流体力学问题。以机械设备上广泛采用的液压传动为例,它是以液体作为工作介质进行能量传递的一种传动方式,在其传动的各个环节都离不开传动介质——液体。在液压系统的设计、分析、工作过程中必须充分掌握传动介质的力学规律,这显然要用到流体力学知识。

## 2. 流体力学的学科分类及研究方法

在流体力学的发展史上,曾经出现过理论流体力学和工程流体力学这两门性质相近的学科,它们在研究内容和方法上稍有差别。前者偏重于数理分析,是连续介质力学的一个组成部分,属于基础科学范畴;后者着眼于工程应用,是工程力学的一个组成部分,属于应用科学范畴。随着现代工农业生产和科学技术的飞速发展,从内容上来说,学科之间的分工越来越细,流体力学领域中已出现许多新兴的分支学科,如地球物理流体力学、物理-化学流体动力学、气体动力学、高超声速空气动力学、超声速空气动力学、环境流体力学、海洋动力学、稀薄空气动力学、电磁流体力学、计算流体力学、两相流体力学等。

尽管学科之间的分工越来越细,但从研究方法上来说,大体可分为现场观测、实验室模拟、理论分析、数值计算四个方面。现场观测是对自然界中或已有工程的流动现象,利用仪器进行

系统观测,从而总结出流体运动的规律,并借以预测流动现象的演变。实验室模拟方法是实际流动问题概括为相似的实验模型,在实验中观察现象、测定数据并进而按照一定方法推测实际结果。实验能显示运动特点及其主要趋势,有助于形成概念,检验理论的正确性。理论分析方法是分析问题的主次因素并提出适当的假定,根据流体运动的普遍规律,如质量守恒、动量守恒、能量守恒等,利用数学分析的手段,研究流体的运动,解释已知的现象,预测可能发生的结果。数值计算是根据理论分析与实验观测拟订计算方案,通过编制程序、输入数据用计算机算出数值解,该方法使许多原来无法用理论分析求解的复杂流体力学问题有了求得数值解的可能性,促进了流体力学计算方法的发展。

这四种研究方法各有特点,需要相辅相成才能推进流体力学的发展。实验需要理论指导,才能从分散的、表面上无联系的现象和实验数据中得出规律性的结论。反之,理论分析和数值计算也要依靠现场观测和实验室模拟给出物理图案或数据,以建立流动的力学模型和数学模式;而且,还须依靠实验来检验这些模型和模式的完善程度。此外,实际流动往往异常复杂,理论分析和数值计算会遇到巨大的数学和计算方面的困难,得不到具体结果,只能通过现场观测和实验室模拟进行研究。

### 3. 流体力学的发展

流体力学的历史非常悠久,它是在人类同自然界作斗争和在生产实践中逐步发展起来的。中国古时候有大禹治水的传说;秦朝的李冰父子带领劳动人民修建了都江堰;大约同一时期,古罗马人建成了大规模的供水管道系统等。早期最著名的研究成果是古希腊阿基米德建立的浮力定律。15世纪,意大利里奥纳多·达·芬奇在著作中提到了管流、水力机械、鸟的飞翔原理等问题;17世纪,帕斯卡阐明了静止流体中压力的概念。但流体力学作为一门科学,却是随着经典力学建立了速度、加速度、力、流场等概念,以及质量、动量、能量三个守恒定律奠定之后才逐步形成的。17世纪,力学奠基人牛顿研究了在流体中运动的物体所受到的阻力,提出了牛顿黏性定律,为流体力学理论的发展铺设了道路。之后,法国皮托发明了测量流速的皮托管;达朗贝尔证实了阻力同物体运动速度之间的平方关系;瑞士的欧拉采用了连续介质的概念建立了欧拉方程;伯努利从能量守恒的角度进行实验分析,得出了伯努利方程;还有拉格朗日、拉普拉斯等科学家都为无黏性流体的流体力学学科的建立作出了重大贡献。19世纪,纳维建立了黏性流体的基本运动方程;斯托克斯又以更合理的基础导出并论证了这组方程,这组方程就是纳维-斯托克斯方程(简称N-S方程),它是流体动力学的理论基础。1904年,德国科学家普朗特建立了边界层理论,能够对边界层内流动状态和流体同固体间的黏性力进行计算。

随着人类社会的发展,流体力学这一学科所涉及的领域将越来越广,学科分工将越来越细。工程流体力学偏重于运用流体力学基本原理和基本方法来分析和解决相关实际问题,它的应用必将越来越广泛。

# 第 1 章 流体的主要物理性质

流体的平衡和运动规律与其自身的物理性质紧密相关,因此有必要对流体的物理性质进行了解,本章将介绍流体的一些主要物理性质。

要求学生通过本章的学习了解流体力学的基本概念、流体的主要物理特性。

## 1.1 连续介质概论

流体和固体一样是由大量分子组成的,并且每个分子都不断地做随机热运动,分子与分子之间存在着分子力的作用。流体包括液体与气体,由于具体形态的不同,气体、液体与固体的属性又有着一定的差别:首先,在相同体积的条件下,固体的分子数目多于液体,而液体又多于气体;其次,在相同分子距的条件下,固体分子力大于液体,而液体大于气体;再次,在外界温度、压强等条件相同的条件下,固体分子距最小,液体分子距次之,气体分子距最大。上述特点决定了气体分子可以在所给的空间内做自由运动,而液体分子只能在小范围内做不规则热运动,固体分子却只能围绕其自身位置做微小的振动。

上述微观结构上的差异导致宏观表象的不同。从受力方面考虑,在绪论中已述及,固体既能承受压力又能承受拉力和剪切力;而流体主要承受压力,不能承受拉力,在微小剪切力的作用下就会产生连续的变形。固体受一定大小外力的作用后产生的变形在外力消除后可以自动恢复;而流体流动后,其变形是不能自行消除的。此外,固体有一定的体积和形状;液体有一定的体积,而无一定的形状;气体既无一定的体积,也无一定的形状。

流体是由无数分子组成的,而分子与分子间有空隙,即从微观角度看,流体并不是连续分布的物质。由于流体力学的任务是要研究宏观流体的运动规律,因而它不研究微观的分子运动。在研究流体的宏观运动中,引用了流体质点和连续介质两个理论模型。

所谓流体质点,就是流体中宏观尺寸非常小而微观尺寸又足够大的任意一个物理实体,也称流体微团。宏观尺寸非常小是指流体质点所占据的宏观体积极限为零;微观尺寸足够大是指流体质点的微观体积大于流体分子尺寸的数量级,即流体质点包含着大量的分子。由于包含大量的分子,所以流体质点就具有了统计平均特性,使得各宏观物理量具有意义。例如,从宏观来看, $10^{-10} \text{ mm}^3$  是很小的体积,但它在标准状态下( $0^\circ\text{C}$ ,  $101325 \text{ Pa}$ ),包含的气体分子的数目约有  $2.7 \times 10^6$  个,而包含的水分子的数目约有  $3.3 \times 10^9$  个。可见,含有足够多分子在内的流体质点,足以使表征宏观运动的各物理量(如密度、压强、速度、温度、动量、动能等)的统计平均值具有实际意义,通过流体质点就把流体的微观结构与宏观表象建立了联系。

研究流体的平衡和运动规律,主要是描述其宏观规律,而不是微观的瞬时运动状态。而分子间的距离是很小的,例如在上例中,水分子间的平均距离为  $10^{-7} \text{ cm}$  数量级,大气中分子间的平均距离为  $10^{-6} \text{ cm}$  数量级。这个距离比起宏观运动所涉及的尺寸来说是非常微小的。因此,从宏观方面来忽略分子间距是可行的。也就是说,可以把流体视为由无数连续分布的流体微团所组成的连续介质,这就是流体的连续介质假设。把流体看成连续介质,实质上也就是说可以把描述流体运动的一系列参数都看成是连续分布的,这样就有可能利用微分方程等数学

工具去研究流体的平衡和运动的规律。需要说明的是,把流体作为连续介质来处理,对于大部分工程技术问题都是适用的;但对于某些特殊问题则不能采用,如当研究火箭在高空非常稀薄的气体中飞行以及高真空技术等方面的问题时,必须舍弃宏观的连续介质的研究方法,而采用微观的分子动力学的研究方法。

## 1.2 流体的密度和相对密度

单位体积流体所具有的质量称为流体的密度,以符号  $\rho$  表示。

对于非均质流体,各点的密度是不相同的,密度的计算式为

$$\rho = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta m}{\Delta V} = \frac{dm}{dV} \quad (1.1)$$

式中: $\Delta V$  为包含所取空间点的体积; $\Delta m$  为该体积对应的流体质量; $\Delta m/\Delta V$  为平均密度,当  $\Delta V$  趋近于一点时,为该点的密度。

对于均质流体,密度的计算式为 
$$\rho = \frac{\Delta m}{\Delta V} \quad (1.2)$$

均质流体是指在空间上质量分布均匀,但流体密度仍然可以随温度和压强而变化。

流体的相对密度是指某种均质流体的质量与相同体积下 4°C 蒸馏水质量之比,也即两者密度之比,相对密度是一个无量纲数,以符号  $d$  表示。如果用下角标  $w$  代表 4°C 蒸馏水的相应物理量,则流体的相对密度为

$$d = \frac{m}{m_w} = \frac{\rho}{\rho_w} \quad (1.3)$$

由于 4°C 蒸馏水的密度为

$$\rho_w = 1000 \text{ kg/m}^3$$

所以,流体密度与相对密度的关系为

$$\rho = 1000d \text{ kg/m}^3 \quad (1.4)$$

表 1.1 列出了几种常见流体在标准大气压下的密度和相对密度。

表 1.1 常见流体的密度和相对密度

流体	温度/°C	密度/(kg/m <sup>3</sup> )	相对密度	流体	温度/°C	密度/(kg/m <sup>3</sup> )	相对密度
空气	0	1.293	0.00129	原油	20	856	0.856
氧气	0	1.429	0.00143	汽油	20	678	0.678
氮气	0	1.251	0.00125	甘油	20	1258	1.258
二氧化碳	0	1.976	0.00196	煤油	20	808	0.808
水蒸气	0	0.804	0.000804	汞	20	13590	13.59
蒸馏水	4	1000	1	石油	15	880~890	0.88~0.89
海水	20	1025	1.025	甲醇	4	810	0.81
苯	20	895	0.895	乙醇(酒精)	20	789	0.789
四氯化碳	20	1588	1.588	矿物系润滑油	15	850~900	0.85~0.90

## 1.3 流体的黏性

当流体微团之间或流体与固体壁面之间有相对运动时,流体内部会产生摩擦力,从而抵抗流体的变形。我们把流体运动时内部产生切应力的这种性质叫做流体的黏性。黏性是流体的重要属性,所有流体都具有黏性。由于黏性的存在使得流体力学问题变得很复杂,必须引起足够的重视。

### 1.3.1 黏性产生的原因

黏性是因为流体内部摩擦力作用而产生的,而内摩擦力的产生原因需要从流体分子的微观运动来考虑。概括地说,黏性是由分子间的相互引力以及分子不规则热运动所产生的动量交换共同构成的。

一方面,当流体微团之间相对运动时,破坏了原有的平衡状态,使相邻分子间的距离加大,分子间的引力必将阻止这种运动趋势,即快速运动的分子层将带动速度较慢的分子层,而慢速运动的分子层将阻碍快速运动的分子层。这种相互运动的宏观表现就是内摩擦力或黏性。

另一方面,由于分子不停地做随机热运动,因此在流体运动的同时,必将存在一定数量的分子在不同速度的层与层之间做迁移运动,从而引起动量交换。当快速层的流体分子进入慢速层时,将较大的动量带入慢速层,从而导致慢速层分子加速;反之,当慢速层的分子进入快速层时,动量交换的结果导致快速层分子减速。这样,通过分子间的动量交换形成了相互间的牵制作用力,其宏观表现也是内摩擦力或黏性。

### 1.3.2 牛顿内摩擦定律

流体微团之间有相对运动时,就会产生内摩擦力,那么如何确定这个力的大小呢?许多科学家做出了努力,但在微积分发明之前,人们还不能掌握流体内部摩擦特性的有关理论。

1686年,牛顿通过实验总结出著名的牛顿内摩擦定律,从而解决了这一难题,现以图 1.1 进行说明。

如图 1.1 所示,在一固定的水平底面上装有薄层液体,厚度为  $\delta$ ,液面上放有面积为  $A$  的平板。施加推力  $F$ ,使平板以速度  $v$  运动。由于流体与固体壁面间的附着力,紧贴上板的流体以速度  $v$  与上板一起运动,而紧贴底面的液体黏附于下板而静止不动。可以设想,流体将以无数紧密相连的薄层形式做平行运动,由于黏性的作用,这些薄层间存在着速度差异,内摩擦力就产生在这些有相对运动的薄层之间。于是在液流横截面上就出现了如图 1.2 所示的速度分布,当间隙  $\delta$  很小时,液体层的速度近似成线性分布。

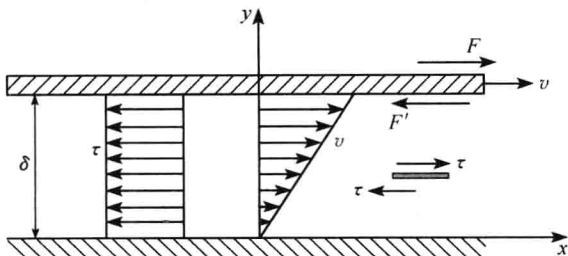


图 1.1 流体的黏性实验示意图

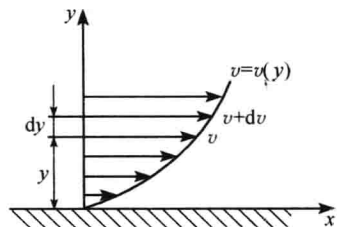


图 1.2 流体的速度非线性分布示意图

不同速度的流体层之间互相滑动,必然在层与层之间产生内部摩擦力或切应力 $\tau$ 。这种切应力作为流体内力,总是大小相等、方向相反地成对出现,并分别作用在紧邻两层流体上。在液体内部如果取出与 $x$ 轴平行的一个极薄的液层作为分离体,则上面比它运动速度大的液层作用在其上的切应力向右,下面比它运动速度小的液层作用在其上的切应力向左,这是属于流体内部的切应力。如果取液体外边界的上平板为分离体,则液体的切应力就会表现为阻止上板运动的摩擦力。反之,如果取整个流体为分离体,则运动平板拖拉顶部液层向右,固定的水平面阻止底部液层运动。

由于平板做匀速运动,因此推动平板的力 $F$ 与液体的摩擦阻力 $F'$ 大小相等。牛顿通过多次实验得知,外力 $F$ 的大小与平板面积 $A$ 及上板运动速度 $v$ 成正比,与两板之间的液层厚度 $\delta$ 成反比,并且和液体种类有关。根据实验总结出的流体对上板摩擦力的表达式为

$$F = \mu A \frac{v}{\delta} \quad (1.5)$$

式中: $F$ 为外力或内摩擦力(N); $A$ 为平板与液层的接触面积( $\text{m}^2$ ); $v$ 为平板运动速度( $\text{m/s}$ ); $\delta$ 为液层厚度(m); $\mu$ 为与液体种类有关的系数,称为动力黏度( $\text{Pa} \cdot \text{s}$ )。

单位面积上所受的力称为应力,如果以摩擦切应力的形式表达,可得

$$\tau = \frac{F}{A} = \mu \frac{v}{\delta} \quad (1.6)$$

式中: $v/\delta$ 为沿速度垂直方向的速度变化率,一般称为速度梯度。

一般情况下,流体流动的速度并不按直线变化,如图 1.2 所示,将速度梯度推广为微分形式,则可得

$$\tau = \pm \mu \frac{dv}{dy} \quad (1.7)$$

式中: $\tau$ 为摩擦切应力( $\text{N}/\text{m}^2$ ); $dv/dy$ 为液层间的速度变化率,即速度梯度。

式(1.7)中“ $\pm$ ”的引入,是考虑到速度梯度可正可负,当 $dv/dy > 0$ 时,式中取“ $+$ ”;当 $dv/dy < 0$ 时,取“ $-$ ”,以保持切应力为正值。

式(1.7)通常称之为牛顿内摩擦定律。可以看出,当 $dv/dy = 0$ 时,即流体内部无相对运动时,摩擦切应力或内摩擦力为零,从而也说明了静止流体内部没有内摩擦力,不显现黏性。

牛顿内摩擦定律表明,流体中的切应力与速度梯度成正比,比例系数即为与流体种类相关的动力黏度。流体的内摩擦力与固体的摩擦力有着很大的不同。首先,静止的流体不能承受切向力,只有内部产生相对运动,即出现速度梯度时才出现摩擦阻力;而固体承受切向力后,不论是否运动,只要有运动趋势就产生摩擦阻力。其次,流体内摩擦力的大小与速度梯度成正比,而与正压力无关;而固体间的摩擦力与运动速度无关,与两固体之间的正压力成正比。

牛顿内摩擦定律适用于空气、水、石油等绝大多数机械工业中常用的流体。凡是符合切应力与速度梯度成正比的流体叫做牛顿流体。不适合牛顿内摩擦定律的流体叫做非牛顿流体,如凝胶、牙膏、泥浆、纸浆、油漆、油墨等。本书所讨论的均为牛顿流体。

### 1.3.3 流体的黏度

#### (1) 黏度的定义及单位

流体黏性的大小通常以黏度来表示和衡量。常用黏度主要有以下两种。

##### 1) 动力黏度

动力黏度又叫绝对黏度,以符号 $\mu$ 表示。从牛顿内摩擦定律可知,动力黏度 $\mu$ 表示单位速



度梯度下的切应力,它反映了流体内摩擦力的大小,因而也代表了黏性的大小。其数学表达式为

$$\mu = \frac{\tau}{dv/dy} \quad (1.8)$$

由量纲分析可知, $\mu$  的量纲

$$[\mu] = \frac{F/L^2}{L/(tL)} = Ft/L^2$$

因此,动力黏度的单位是  $N \cdot s/m^2$  或  $Pa \cdot s$ 。可见它之所以称为动力黏度,是因为它的量纲中含有动力学量纲。

## 2) 运动黏度

在流体力学的理论分析及工程计算中经常出现动力黏度  $\mu$  与液体密度  $\rho$  的比值,为简化起见,将其定义为一个新的物理量,称为运动黏度,用符号  $\nu$  表示,即

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (1.9)$$

运动黏度的量纲

$$[\nu] = \frac{[\mu]}{[\rho]} = \frac{Ft/L^2}{M/L^3} = \frac{ML/t^2 \cdot t/L^2}{M/L^3} = L^2/t$$

因此,运动黏度的单位是  $m^2/s$ 。可见它之所以称为运动黏度,是因为它的量纲中仅含有运动学量纲。

## (2) 黏度的变化规律

流体的黏度受温度和压强的影响,当温度和压强发生变化时,黏度也要发生变化。由于液体和气体的分子结构及运动机理的差异,导致它们的黏度变化规律迥然不同。

通常情况下,液体分子间距较小,分子引力较大,因此其黏度的大小主要由分子引力决定。当温度升高或压强降低时,液体膨胀、分子间距增大、分子引力减小,因此黏度降低。反之,当温度降低或压强升高时,液体黏度增大。其黏度变化规律可由经验公式表示为

$$\mu = \mu_0 e^{\alpha p - \lambda(t-t_0)} \quad (1.10)$$

式中: $\mu$  为温度为  $t(^{\circ}C)$ 、计示压强为  $p$  时的液体动力黏度; $\mu_0$  为温度为已知常温  $t_0(^{\circ}C)$ (可取  $t_0=0^{\circ}C$ 、 $15^{\circ}C$  或  $20^{\circ}C$  等)、计示压强为零时的液体动力黏度; $\alpha$  为黏压指数,反映压强升高时液体黏度增长快慢程度的一个指数; $\lambda$  为黏温指数,反映温度升高时液体黏度降低快慢程度的一个指数。

单独考虑压强或温度的影响时,可将式(1.10)分解为

$$\mu = \mu_0 e^{\alpha p} \quad (1.11)$$

和

$$\mu = \mu_0 e^{-\lambda(t-t_0)} \quad (1.12)$$

式(1.11)为液体黏度随压强的变化规律,式(1.12)为液体黏度随温度的变化规律。通常,水的黏压指数约为  $\alpha=0.0007$ ,液压油的黏压指数  $\alpha=0.002 \sim 0.003$ ;液体的黏温指数  $\lambda=0.035 \sim 0.052$ 。可见液体黏度受压强的影响不是很显著,当压强低于  $10MPa$  时,常常忽略此种影响。液体黏度受温度的影响比较显著,液体温度稍有升高,则液体的动力黏度和运动黏度均有明显下降,常用液压油的黏温曲线可查有关设计手册。

气体与液体的黏度变化规律不同,由于气体分子间距比较大而且分子运动比较剧烈,影响气体黏度大小的主要因素不是分子引力而是分子热运动所产生的动量交换。按照分子运动论,气体动力黏度的统计平均值为



$$\mu = \frac{1}{3} \rho v l \quad (1.13)$$

式中： $\mu$ 为气体动力黏度； $\rho$ 为分子密度； $v$ 为分子运动平均速度； $l$ 为分子平均自由程。

由于  $v$ 、 $l$  均与温度成正比、与压强成反比，尽管  $\rho$  的变化规律与之相反，但其变化不如  $v$ 、 $l$  变化显著，所以当温度升高时，气体动力黏度与运动黏度增大；而当压强提高时，气体动力黏度与运动黏度减小。

表 1.2 列出了常压下水与空气在不同温度时的黏度数值。

表 1.2 水与空气的黏度数值

温度 /°C	水		空气	
	$\mu/(\text{Pa} \cdot \text{s})$	$\nu/(\text{m}^2/\text{s})$	$\mu/(\text{Pa} \cdot \text{s})$	$\nu/(\text{m}^2/\text{s})$
0	$1.792 \times 10^{-3}$	$1.792 \times 10^{-6}$	$0.0172 \times 10^{-3}$	$13.7 \times 10^{-6}$
10	$1.308 \times 10^{-3}$	$1.308 \times 10^{-6}$	$0.0178 \times 10^{-3}$	$14.7 \times 10^{-6}$
20	$1.005 \times 10^{-3}$	$1.007 \times 10^{-6}$	$0.0183 \times 10^{-3}$	$15.7 \times 10^{-6}$
30	$0.801 \times 10^{-3}$	$0.804 \times 10^{-6}$	$0.0187 \times 10^{-3}$	$16.6 \times 10^{-6}$
40	$0.656 \times 10^{-3}$	$0.661 \times 10^{-6}$	$0.0192 \times 10^{-3}$	$17.6 \times 10^{-6}$
50	$0.549 \times 10^{-3}$	$0.556 \times 10^{-6}$	$0.0196 \times 10^{-3}$	$18.6 \times 10^{-6}$
60	$0.469 \times 10^{-3}$	$0.477 \times 10^{-6}$	$0.0201 \times 10^{-3}$	$19.6 \times 10^{-6}$
70	$0.406 \times 10^{-3}$	$0.415 \times 10^{-6}$	$0.0204 \times 10^{-3}$	$20.6 \times 10^{-6}$
80	$0.357 \times 10^{-3}$	$0.367 \times 10^{-6}$	$0.0210 \times 10^{-3}$	$21.7 \times 10^{-6}$
90	$0.317 \times 10^{-3}$	$0.328 \times 10^{-6}$	$0.0216 \times 10^{-3}$	$22.9 \times 10^{-6}$
100	$0.284 \times 10^{-3}$	$0.296 \times 10^{-6}$	$0.0218 \times 10^{-3}$	$23.6 \times 10^{-6}$

### 1.3.4 理想流体

实际流体都具有黏性，黏性是一个十分复杂的问题，其影响因素众多。如果将实际因素都考虑在内，则问题有时难以解决。所以，人们假想了一种没有黏性或不考虑黏性的流体模型，称为理想流体。这种流体在运动时不仅内部不存在摩擦力，而且在它与固体接触的边界上也不存在摩擦力。忽略黏性的影响，则很多问题都可以较容易地得到解决。尽管实际中没有理想流体，但是理想流体概念的引入对于分析实际问题却有着重大意义。因为许多工程问题中黏性并不起主要作用，把它作为理想流体来处理，可以很容易地分析其力学关系，且所得结果与实际并无太大出入。对于那些黏性不可忽略的流体，先把它当作理想流体来进行理论分析和数学推导，得出其运动的基本规律，然后再考虑黏性的影响，通过实验对理想流体分析的结果加以修正，从而得出最终的结论。

理想流体概念的引入无论是对于流体力学基本理论的建立还是实际应用都是十分有益的，它是一种科学的认识方法。许多流体力学基本理论就是从理想流体着手进行分析，再考虑实际流体黏性的影响，逐渐完善起来的。

**例题 1.1** 图 1.3 是一根内直径  $D=74\text{mm}$  的垂直圆管；管内有一质量为  $2.5\text{kg}$  的活塞，其  $d=73.8\text{mm}$ ， $L=150\text{mm}$ 。活塞与圆管完全对中，两者间隙为  $0.1\text{mm}$ ，间隙中充满润滑油膜。润滑油黏度  $\mu=7 \times 10^{-3}\text{Pa} \cdot \text{s}$ 。若不考虑空气压力，试求当活塞自由下落时其最终的平衡速度，即活塞重力与活塞表面摩擦力相等时的速度。