

全国普通高等院校 土木工程类  
实用创新型 系列规划教材

# 流体力学

施永生 徐向荣 主 编  
张 英 副主编  
夏四清 主 审



科学出版社

[www.sciencep.com](http://www.sciencep.com)

中国科学院教材建设专家委员会教材建设立项项目  
全国普通高等院校土木工程类**实用创新型**系列规划教材

---



# 流体力学

施永生 徐向荣 主编  
张英 副主编  
夏四清 主审

科学出版社

北京

## 内 容 简 介

本书主要根据全国土木工程专业指导委员会确定的流体力学课程基本要求编写。书中系统地阐述了流体力学的基本概念、基本理论和工程应用。全书共分为十二章,主要内容包括绪论,流体静力学,流体动力学基础,量纲分析与相似理论,流动阻力与其能量损失,孔口、管嘴出流与有压管道流动,明渠流动,堰流,渗流,可压缩流体在管中流动,边界层与绕流流动,气体射流。各章均编写了一定数量的例题和习题,书末附有习题答案。

本书可作为高等学校土木工程专业及给水排水工程、环境工程、市政工程、建筑环境与设备工程等土建类各个专业的本科教材,也可作为相关专业技术人员的参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

流体力学/施永生,徐向荣主编. —北京:科学出版社,2005  
(全国普通高等院校土木工程类实用创新型系列规划教材)  
ISBN 7-03-015520-3

I. 流… II. ①施… ②徐… III. 流体力学-高等学校-教材 IV. 035

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 047556 号

责任编辑:童安齐 何舒民/责任校对:刘彦妮  
责任印制:吕春珉/封面设计:耕者设计工作室

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>

铭浩彩色印装有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2005年9月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2005年9月第一次印刷 印张:20 1/2

印数:1--3 000 字数:475 000

定价:29.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换(环伟))

销售部电话 010-62136131 编辑部电话 010-62137026(HA03)

# 全国普通高等院校土木工程类实用创新型 系列规划教材

## 编 委 会

**主 任** 霍 达

**副主任** (按姓氏笔画排序)

周 云 阎兴华 童安齐

**秘书长** 张志清

**委 员** (按姓氏笔画排序)

白晓红 石振武 刘继明 何浙浙 何舒民

张文福 张延庆 张志清 沈 建 周 云

周亦唐 宗 兰 徐向荣 阎兴华 翁维素

傅传国 程赫明 韩建平 童安齐 雷宏刚

霍 达

## 前 言

流体力学是力学的一个分支,它研究流体静止和运动的力学规律及其在工程技术中的应用。流体力学是长期以来人们在认识流体的过程中逐渐形成的一门学科,随着理工学科和流体工程学科相互推动而得到发展。流体力学是土木工程专业及土建类各个专业的一门重要技术基础课。

本书主要根据全国土木工程专业指导委员会确定的流体力学课程基本要求编写。

书中系统地阐述了流体力学的基本概念、基本理论和工程应用。全书共分为十二章,主要内容包括绪论,流体静力学,流体动力学基础,量纲分析与相似理论,流动阻力与其能量损失,孔口、管嘴出流与有压管道流动,明渠流动,堰流,渗流,可压缩流体在管中流动,边界层与绕流流动,气体射流。为了便于读者加深基本知识的理解、巩固基础理论和加强分析计算能力,各章均编写了一定数量的例题和习题,书末附有习题答案。

本书可作为高等学校土木工程专业及给水排水工程、环境工程、市政工程、建筑环境与设备工程等土建类各个专业的本科教材。由于书中包含了土建类各个专业所需要的内容,使用时,可根据专业要求和学时多少作必要的取舍。

本书由昆明理工大学施永生、内蒙古工业大学徐向荣担任主编,北京工业大学张英担任副主编。具体分工为:徐向荣编写第一、十、十一和十二章;张英编写第二、三章;施永生编写第四、六章;李会知编写第五章;王琳编写第七章;冯燕编写第八、九章。全书由施永生、徐向荣整理和修改。

本书由同济大学夏四清教授担任主审。

由于编者水平和实践经验所限,书中难免存在不足之处,恳请读者批评指正。

# 目 录

## 前言

<b>第一章 绪论</b> .....	1
1.1 流体力学的研究对象、任务及其应用 .....	1
1.2 流体的主要物理性质 .....	2
1.2.1 惯性 .....	2
1.2.2 重力特性 .....	2
1.2.3 流体的黏度 .....	3
1.2.4 流体的压缩性和膨胀性 .....	6
1.2.5 表面张力特性 .....	10
1.3 作用在流体上的力 .....	11
1.3.1 表面力 .....	11
1.3.2 质量力 .....	12
1.4 流体的力学模型 .....	13
1.4.1 连续介质与非连续介质模型 .....	13
1.4.2 理想流体与黏性流体(实际流体)的力学模型 .....	13
1.4.3 不可压缩流体与可压缩流体的力学模型 .....	13
习题 .....	14
<b>第二章 流体静力学</b> .....	15
2.1 流体静压强及其特性 .....	15
2.1.1 流体静压强的定义 .....	15
2.1.2 流体静压强的特性 .....	15
2.2 流体平衡微分方程 .....	18
2.2.1 流体平衡微分方程 .....	18
2.2.2 流体平衡微分方程的积分 .....	19
2.3 重力场中流体静压强的分布规律 .....	20
2.3.1 流体静力学基本方程 .....	20
2.3.2 帕斯卡原理 .....	21
2.3.3 等压面 .....	22
2.3.4 流体静力学基本方程的意义 .....	23
2.3.5 静水压强分布图 .....	24
2.4 压强的表示方法和量度单位 .....	24
2.4.1 压强的表示方法 .....	24
2.4.2 压强的量度单位 .....	25
2.5 液柱式测压计 .....	26
2.5.1 测压管 .....	26

2.5.2	水银测压计 .....	26
2.5.3	水银压差计 .....	26
2.5.4	金属测压计 .....	27
2.5.5	真空计 .....	27
2.6	作用于平面壁上的静水总压力 .....	28
2.6.1	解析法 .....	28
2.6.2	图算法 .....	29
2.7	作用于曲面壁上的静水总压力 .....	31
2.7.1	静水总压力的水平分力和铅垂分力 .....	31
2.7.2	压力体 .....	32
2.7.3	静水总压力的作用点 .....	33
2.7.4	潜体、浮体的平衡和稳定性 .....	34
2.8	流体的相对平衡 .....	38
2.8.1	等加速直线运动容器中液体的相对平衡 .....	38
2.8.2	等角速旋转运动容器中液体的相对平衡 .....	40
	习题 .....	43
<b>第三章</b>	<b>流体动力学基础</b> .....	<b>49</b>
3.1	描述流体运动的方法 .....	49
3.1.1	拉格朗日法 .....	49
3.1.2	欧拉法 .....	49
3.2	欧拉法的基本概念 .....	51
3.2.1	恒定流与非恒定流 .....	51
3.2.2	一元流动、二元流动、三元流动 .....	51
3.2.3	流线 .....	51
3.2.4	均匀流与非均匀流、渐变流与急变流 .....	54
3.2.5	流管、元流、总流 .....	55
3.2.6	过流断面、流量、断面平均流速 .....	56
3.3	恒定总流连续性方程 .....	57
3.4	元流能量方程 .....	58
3.4.1	元流能量方程 .....	58
3.4.2	元流能量方程的物理意义和几何意义 .....	60
3.5	恒定总流能量方程 .....	61
3.6	恒定总流能量方程的应用 .....	63
3.6.1	能量方程的应用 .....	63
3.6.2	毕托管原理 .....	66
3.6.3	水头线 .....	67
3.7	恒定气流能量方程式 .....	68
3.7.1	气流能量方程式与液体能量方程式的几点区别 .....	68
3.7.2	不可压缩气流能量方程 .....	70
3.7.3	总压线和全压线 .....	71

3.8 恒定总流动量方程	74
3.8.1 恒定总流动量方程	74
3.8.2 恒定总流动量方程的应用	76
习题	78
<b>第四章 量纲分析与相似理论</b>	<b>83</b>
4.1 量纲分析的概念和原理	83
4.1.1 量纲	83
4.1.2 无量纲量	84
4.1.3 量纲和谐	85
4.2 量纲分析法	85
4.2.1 瑞利法	86
4.2.2 $\pi$ 定理	88
4.3 流动相似性原理	92
4.3.1 力学相似	93
4.3.2 相似准则	95
4.4 模型试验设计	98
4.4.1 模型律的选择	98
4.4.2 模型的设计	99
习题	101
<b>第五章 流动阻力与其能量损失</b>	<b>103</b>
5.1 流动阻力与能量损失的分类	103
5.2 层流与紊流、雷诺数	104
5.2.1 雷诺实验	105
5.2.2 流态的判别准则——临界雷诺数	106
5.3 均匀流基本方程及沿程水头损失通用公式	107
5.3.1 均匀流基本方程	108
5.3.2 沿程损失的通用公式	109
5.4 圆管中的层流流动	110
5.4.1 断面流速分布特征	110
5.4.2 沿程损失与沿程阻力系数	111
5.5 紊流流动	113
5.5.1 紊流的成因	113
5.5.2 紊流的特征	114
5.5.3 紊流的时均化描述	115
5.5.4 紊流切应力和混合长度假说	116
5.5.5 层流底层	117
5.5.6 圆管紊流核心区的流速分布	119
5.6 紊流的沿程损失	121
5.6.1 尼古拉兹实验	121
5.6.2 $\lambda$ 的计算公式	123



5.6.3	工业管道的沿程损失 .....	124
5.6.4	明渠流的沿程损失 .....	125
5.7	流动的局部损失 .....	129
5.7.1	局部水头损失的一般分析 .....	129
5.7.2	突扩圆管的局部水头损失 .....	129
5.7.3	其他类型的局部水头损失 .....	131
5.8	减少阻力的措施 .....	132
	习题 .....	134
<b>第六章</b>	<b>孔口、管嘴出流与有压管道流</b> .....	<b>138</b>
6.1	孔口及管嘴的恒定出流 .....	138
6.1.1	薄壁小孔口自由出流 .....	138
6.1.2	大孔口出流 .....	140
6.1.3	薄壁孔口的淹没出流 .....	141
6.1.4	管嘴出流 .....	141
6.2	孔口及管嘴的非恒定出流 .....	143
6.3	短管的水力计算 .....	144
6.3.1	有压短管水力计算 .....	145
6.3.2	常见短管的水力计算问题 .....	146
6.4	长管的水力计算 .....	151
6.4.1	简单长管的水力计算 .....	151
6.4.2	复杂管道 .....	153
6.4.3	沿程均匀泄流管路 .....	154
6.5	管网水力计算基础 .....	156
6.5.1	枝状管网 .....	156
6.5.2	环状管网 .....	158
6.6	水击 .....	160
6.6.1	水击现象 .....	161
6.6.2	水击压强计算 .....	163
6.6.3	防止水击危害的措施 .....	165
6.7	离心式水泵及其水力计算 .....	166
6.7.1	离心式水泵工作原理 .....	166
6.7.2	离心泵性能参数 .....	166
6.7.3	水力计算 .....	167
	习题 .....	169
<b>第七章</b>	<b>明渠流动</b> .....	<b>174</b>
7.1	明渠的分类 .....	174
7.2	明渠均匀流 .....	175
7.2.1	明渠均匀流的特征及形成条件 .....	175
7.2.2	明渠均匀流的基本公式 .....	176
7.2.3	明渠的水力最佳断面和冲淤流速 .....	178

7.2.4	明渠均匀流水力计算的基本问题和方法 .....	180
7.3	明渠恒定非均匀流动的若干基本概念 .....	187
7.3.1	断面单位能量 .....	189
7.3.2	临界水深 .....	190
7.3.3	临界坡度 .....	191
7.3.4	缓流、急流、临界流及其判别 .....	192
7.4	水跃和跌水 .....	195
7.4.1	水跃 .....	195
7.4.2	跌水 .....	198
7.5	明渠恒定非均匀渐变流的基本微分方程 .....	199
7.6	棱柱形渠道中恒定非均匀渐变流的水面曲线分析 .....	200
7.6.1	水流的渐变流段与局部现象 .....	200
7.6.2	渐变流水面曲线的变化规律 .....	201
7.6.3	水面曲线分析的一般原则 .....	204
7.7	棱柱形渠道中恒定非均匀渐变流水面曲线的计算 .....	206
7.7.1	分段求和法 .....	206
7.7.2	数值积分法 .....	207
7.7.3	计算机在水面曲线计算中的应用 .....	208
	习题 .....	211
<b>第八章</b>	<b>堰流</b> .....	216
8.1	堰流的定义及分类 .....	216
8.1.1	堰和堰流 .....	216
8.1.2	堰的分类 .....	217
8.2	堰流基本公式 .....	218
8.3	宽顶堰 .....	219
8.3.1	流量公式及流量系数 .....	219
8.3.2	侧收缩系数 .....	220
8.3.3	淹没条件及淹没系数 .....	220
8.4	薄壁堰和实用断面堰 .....	222
8.4.1	薄壁堰 .....	222
8.4.2	实用断面堰 .....	225
8.5	小桥孔径水力计算 .....	226
8.5.1	小桥孔径的水力计算公式 .....	226
8.5.2	小桥孔径的水力计算 .....	227
8.6	消力池水力计算 .....	230
8.6.1	水工建筑物下游的水流衔接与消能 .....	230
8.6.2	消力池水力计算 .....	231
	习题 .....	233
<b>第九章</b>	<b>渗流</b> .....	235
9.1	渗流基本定律 .....	235

9.1.1	渗流理论的实用意义 .....	235
9.1.2	地下水的状态 .....	235
9.1.3	土的渗流特性 .....	236
9.1.4	渗流模型 .....	236
9.1.5	渗流的基本定律——达西定律 .....	237
9.1.6	流沙和管涌 .....	240
9.2	地下水的均匀流与非均匀流 .....	241
9.2.1	恒定均匀渗流和非均匀渐变渗流的断面流速分布 .....	241
9.2.2	渐变渗流基本微分方程 .....	242
9.2.3	渐变渗流浸润曲线 .....	242
9.3	集水廊道和井 .....	245
9.3.1	集水廊道 .....	245
9.3.2	井 .....	246
9.4	井群 .....	249
9.4.1	潜水完整井群 .....	250
9.4.2	承压完整井群 .....	251
9.5	流网及其在渗流计算中的应用 .....	252
9.5.1	平面有压渗流流网的绘制 .....	252
9.5.2	利用流网进行渗流计算 .....	253
	习题 .....	255
<b>第十章</b>	<b>可压缩流体在管中的流动</b> .....	<b>257</b>
10.1	理想气体一元稳定流动的伯努利方程 .....	257
10.1.1	气体一元等温流动 .....	257
10.1.2	气体一元定容流动 .....	258
10.1.3	气体一元绝热流 .....	258
10.2	音速、滞止参数和马赫数 .....	261
10.2.1	音速 .....	261
10.2.2	滞止参数 .....	262
10.2.3	马赫数 .....	263
10.3	气体一元稳定流动的连续性方程 .....	264
10.3.1	连续性微分方程 .....	264
10.3.2	气流速度与断面的关系 .....	265
10.4	绝热管流 .....	266
10.4.1	气体管路运动微分方程 .....	266
10.4.2	绝热管路运动方程 .....	267
10.5	等温管流 .....	268
10.6	速度系数 .....	269
	习题 .....	272
<b>第十一章</b>	<b>边界层与绕流流动</b> .....	<b>273</b>
11.1	边界层概念 .....	273

11.1.1	边界层的形成及其性质 .....	273
11.1.2	边界层的厚度和流态 .....	274
11.1.3	管流边界层 .....	274
11.1.4	曲面边界层的分离现象 .....	275
11.1.5	卡门涡列 .....	276
11.2	边界层动量方程 .....	277
11.3	平板上层流边界层 .....	279
11.4	平板上紊流边界层 .....	281
11.5	绕流阻力和升力 .....	284
11.5.1	绕流阻力 .....	284
11.5.2	绕流升力 .....	286
11.5.3	悬浮速度 .....	287
	习题 .....	289
<b>第十二章</b>	<b>气体射流</b> .....	<b>291</b>
12.1	紊流射流特征 .....	291
12.1.1	射流的分类 .....	291
12.1.2	紊流射流的形成 .....	291
12.1.3	射流的几何特征 .....	292
12.1.4	运动特征 .....	293
12.1.5	动力特征 .....	294
12.2	圆断面射流的运动分析 .....	294
12.2.1	轴心速度 .....	295
12.2.2	断面流量 .....	296
12.2.3	断面平均流速 .....	296
12.2.4	质量平均流速 .....	296
12.2.5	起始段核心长度 $S_n$ 及核心收缩角 $\beta$ .....	297
12.2.6	起始段流量 $Q_n$ .....	297
12.2.7	起始段截面平均流速 $v_{n1}$ .....	298
12.2.8	起始段质量平均流速 $v_{n2}$ .....	299
12.3	平面射流 .....	300
12.4	温差或浓差射流 .....	301
12.4.1	轴心温差 $\Delta T_m$ .....	302
12.4.2	质量平均温差 $\Delta T_2$ .....	303
12.4.3	起始段质量平均温差 $\Delta T_{n2}$ .....	303
12.4.4	射流弯曲 .....	304
12.5	紊流射流计算方法的改进 .....	308
12.5.1	射流结构 .....	308
12.5.2	动量修正系数 $\beta_0$ .....	309
12.5.3	射流半径 $R$ .....	309
12.5.4	轴心速度 $v_m$ .....	310

12.5.5	平面射流 .....	311
12.5.6	温差(或浓差)射流及轴轨迹 .....	311
12.6	有限空间射流简介 .....	312
12.6.1	射流结构 .....	312
12.6.2	动力特性 .....	313
12.6.3	半经验公式 .....	313
	习题 .....	314
	<b>习题答案</b> .....	<b>316</b>
	<b>主要参考文献</b> .....	<b>322</b>

# 第一章 绪 论

流体力学是长期以来人们在认识流体的过程中逐渐形成的一门学科,它起源于公元前三世纪阿基米德对浮力的研究,其随着理工学科和流体工程学科相互推动而得到发展。

液体和气体统称为流体。

流体力学是力学的一个分支,它研究流体静止和运动的力学规律及其在工程技术中的应用。

## 1.1 流体力学的研究对象、任务及其应用

流体力学由两个基本部分组成:一是研究流体平衡规律的流体静力学;二是研究流体运动规律的流体动力学。

物质是由分子组成的,在一定的外界条件下,根据组成物质的分子间的距离和相互作用的强弱不同,物质的状态分为气态、液态和固态。气态物质在标准状态( $0^{\circ}\text{C}$ ,  $101\ 325\text{Pa}$ )下,分子间的平均距离大于分子直径的 10 倍,分子间的相互作用微弱,不能保持一定的体积和形状,当外部压力增大时,其体积按一定的规律缩小,具有较大的可压缩性。液态物质分子间平均距离约为分子直径的 1 倍,分子间相互作用较大,通常可以保持其固有体积,但不能保持其形状。固体物质则具有固定的形状和体积。

那么,为什么流体力学同时研究液体和气体的受力和运动规律呢?因为,从物质受力和运动的特性来看,物质又可以分为两大类:一类物质不能抵抗切向力,在切向力的作用下可以无限变形,这种变形称为流动,这类物质称为流体,其变形的速度即流动速度与切向力的大小有关,气体和液体都属于流体;另一类是固体物质,它能承受一定的切应力,其切应力与变形的大小呈一定的比例关系。所以,力学分为流体力学和固体力学。

流体力学和其他科学一样是在人类征服自然的长期斗争中逐渐建立和发展起来的,而它的发展又有力地推动了科学技术和生产的进步。它在生产部门中有着广泛的应用,是水利、航空、化工、城市建设、环境工程等部门的重要基础理论之一。

在土木工程专业中,流体力学是一门重要的基础课程。专业中的主要内容:工程地质、桥梁工程、道路工程、建筑设备工程及土木工程施工,都应用流体的物理特性、平衡与运动规律,将它们有效的组织起来应用于这些技术工程之中的。因此,只有学好流体力学,才能对专业中的流体力学现象做出科学的定性分析及精确的定量计算,才能正确地解决工程中所遇到的流体力学方面的施工、设计计算与检测等问题。

学习流体力学,要把注意力放在基本原理、基本概念、基本方法的理解和掌握方面,要学会理论联系实际地分析和解决工程中的各种流体力学问题。

本书采用国际单位制,基本单位是:长度用米,代号为  $\text{m}$ ;时间用秒,代号为  $\text{s}$ ;质量用千克,代号为  $\text{kg}$ 。力为导出单位,采用牛顿,代号为  $\text{N}$ ,  $1\text{N}=1\text{kg}\cdot\text{m}/\text{s}^2$ 。由于我国长期采用工程单位,实际施工现场有时仍习惯工程单位,学习时必须注意两种单位的换算。

## 1.2 流体的主要物理性质

流体的物理性质是决定流动状态的内在因素,同流体运动有关的主要物理性质是惯性、黏性和压缩性。

### 1.2.1 惯性

惯性是物体保持原有运动状态的性质,凡改变物体的运动状态,就必须克服惯性的作用。质量是惯性大小的度量,质量越大,惯性越大,运动状态越难改变。流体的质量常用密度来反映。对于均质流体,单位体积的质量称为密度,以符号  $\rho$  表示,即

$$\rho = m/V \quad (1.1)$$

式中: $\rho$ ——流体的密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;

$m$ ——体积为  $V$  的流体质量,  $\text{kg}$ ;

$V$ ——质量为  $m$  的流体体积,  $\text{m}^3$ 。

液体的密度随压强和温度的变化量很小,可视为常数,一般采用水的密度为  $1000\text{kg}/\text{m}^3$ ,水银的密度为  $13\,600\text{kg}/\text{m}^3$ 。

气体的密度随压强和温度变化,  $1\text{atm}^{\text{①}}$   $0^\circ\text{C}$  空气的密度为  $1.29\text{kg}/\text{m}^3$ 。

在  $1\text{atm}$  条件下,水的密度见表 1.1;常见流体的密度见表 1.2。

表 1.1 水的密度

温度/ $^\circ\text{C}$	0	4	10	20	30
密度/ $(\text{kg}/\text{m}^3)$	999.87	1000.00	999.73	998.23	995.67
温度/ $^\circ\text{C}$	40	50	60	80	100
密度/ $(\text{kg}/\text{m}^3)$	992.24	988.07	983.24	971.83	958.38

表 1.2 几种常见流体的密度

流体名称	空气	乙醇	二氧化碳	水银	汽油	海水
温度/ $^\circ\text{C}$	20	20	20	20	15	15
密度/ $(\text{kg}/\text{m}^3)$	1.20	799	1590	13\,550	700~750	1020~1030

对于非均质流体,各点处的密度不同,任一点处的密度用极限式表示为

$$\rho = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta m}{\Delta V} \quad (1.2)$$

式中: $\Delta m$ ——包含该点微小体积  $\Delta V$  中的流体质量,  $\text{kg}$ ;

$\Delta V$ ——质量  $\Delta m$  所占体积,  $\text{m}^3$ 。

### 1.2.2 重力特性

流体所受地球的引力为流体的重力特性。流体的重力特性用容量表示。单位体积流

<sup>①</sup> atm 为非法定单位,  $1\text{atm} = 101.325\text{kPa}$ ,下同。

体所受引力为流体的容重,用符号  $\gamma$  表示。

均质流体的容重为

$$\gamma = G/V \quad (1.3)$$

式中:  $\gamma$ ——流体的容重,  $N/m^3$ ;

$G$ ——体积为  $V$  的流体所受引力或称重力,  $N$ ;

$V$ ——重力为  $G$  的流体体积,  $m^3$ 。

非均质流体任一点处的容重为

$$\gamma = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta G}{\Delta V} \quad (1.4)$$

式中:  $\Delta G$ ——作用在微小体积  $\Delta V$  的流体重力,  $N$ ;

$\Delta V$ ——包含该点在内的流体体积,  $m^3$ 。

在地球引力场中,密度与容重有以下关系

$$\gamma = \rho g \quad (1.5)$$

这个关系对均质和非均质流体都适用。

**【例 1.1】** 已知汽油的密度  $\rho = 700 \text{ kg/m}^3$ , 求其容重。3L 的此种汽油, 质量和重量为多少?

**【解】** 根据式(1.5), 汽油容重为

$$\gamma = \rho g = 700 \times 9.81 = 6876 \text{ (N/m}^3\text{)}$$

由  $M = \rho V$  和  $G = \gamma V$ , 得到汽油质量为

$$M = 700 \times 0.003 \text{ (m}^3\text{)} = 2.1 \text{ (kg)}$$

汽油重量为

$$G = 6867 \times 0.003 = 20.6 \text{ (N)}$$

### 1.2.3 流体的黏度

#### 1. 牛顿(Newton)内摩擦定律,流体的黏度

流体是不能承受剪切力的,即在很小的剪切力作用下,流体会不断地变形。但不同的流体在相同的剪切作用下其变形的速度是不同的,也就是不同的流体抵抗剪切力的能力不同,这种能力称为流体的黏性。流体的黏性是流体的一种基本属性。

17 世纪牛顿在其名著《自然哲学的数学原理》中研究了流体的黏性。设有两块相距很近的平板,平板之间充满流体(图 1.1)。

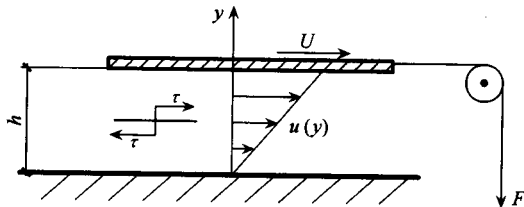


图 1.1 平行平板间的黏性流动

下平板固定不动,上平板在牵引力的作用下均匀速度  $U$  运动,与平板接触的流体附着于平板的表面,带动两板之间的流体做相对运动,使流体内部流层之间出现成对的切向



力,称为内摩擦力。由于液体的黏附作用,附着在下板上的流体质点层的速度为零,而上板上附着的流体质点层,则以速度  $U$  随同上板一起运动。在平板间距离  $h$  和速度  $U$  不大的情况下,两板之间的流体速度呈线性分布,即

$$u(y) = \frac{U}{h}y$$

可见,流体做相对运动时,必然在内部产生内摩擦力以抵抗流体的相对运动,这就是流体的黏滞性。牛顿经过大量实验证明,对于大多数流体,内摩擦力  $F$  的大小与两层平板法向的速度梯度  $du/dy$ ,接触面  $A$  成正比;与流体的物理性质有关;与接触面上的压力无关。数学表示式为

$$F = \mu A \frac{du}{dy} \quad (1.6)$$

设  $\tau$  为单位面积上的内摩擦力即黏滞切应力,则

$$\tau = \frac{F}{A} = \mu \frac{U}{h}$$

当速度分布不是直线规律时,任一点的速度梯度为  $du/dy$ ,因而切应力大小为

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

式中: $\tau$ ——切向力(不仅有大小,还有方向), $N/m^2$ ,即 Pa;

$du/dy$ ——速度梯度,表示速度沿垂直于速度方向  $y$  的变化率,1/s;

$\mu$ ——流体的动力黏度系数, $N/(m^2 \cdot s)$ ,即 Pa  $\cdot$  s.

式(1.7)称为牛顿黏滞公式,也称牛顿内摩擦定律。

比例系数  $\mu$  表征了流体抵抗变形的能力,即流体黏性的大小,称为流体的动力黏度,或简称为黏度。工程中还常用动力黏度  $\mu$  与密度  $\rho$  的比值来表示黏度,称为流体的运动黏度  $\nu$ ,即

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (1.8)$$

式中: $\nu$ ——流体的运动黏度系数, $cm^2/s$ (称斯托克斯,简称斯)。

表 1.3 列举了在不同温度时水的黏滞系数。表 1.4 列举了一个大气压下(压强为  $98.07kN/m^2$ )不同温度时空气的黏滞系数。

表 1.3 水的黏滞系数

$T$ / $^{\circ}C$	$\mu$ / $(\times 10^{-3}Pa \cdot s)$	$\nu$ / $(\times 10^{-6}m^2/s)$	$T$ / $^{\circ}C$	$\mu$ / $(\times 10^{-3}Pa \cdot s)$	$\nu$ / $(\times 10^{-6}m^2/s)$
0	1.792	1.792	40	0.656	0.661
5	1.519	1.519	45	0.599	0.605
10	1.308	1.308	50	0.549	0.556
15	1.140	1.140	60	0.469	0.477
20	1.005	1.007	70	0.406	0.415
25	0.894	0.897	80	0.357	0.367
30	0.801	0.804	90	0.317	0.328
35	0.723	0.727	100	0.284	0.296