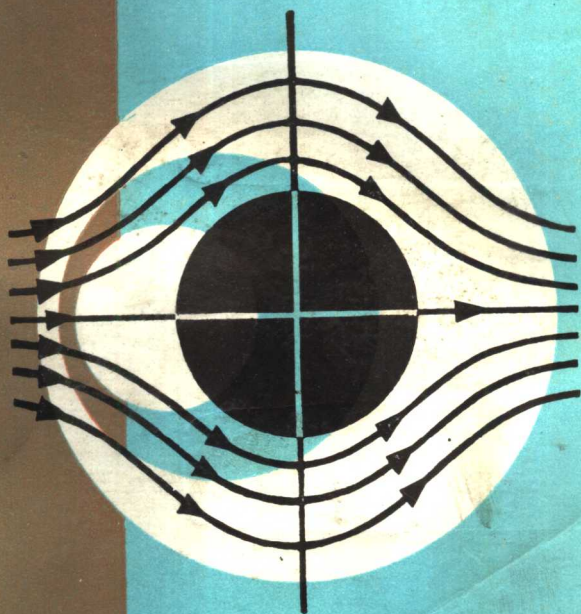


流体力学浅说

中学生文库

ZHONGXUESHENG WENKU



上海教育出版社

中学生文库



ZHONGXUESHENG WENKU

流体力学浅说

徐有恒 穆 晨 编著

上海教育出版社

责任编辑 朱士宏

封面设计 范一辛

中学生文库 流体力学浅说

徐有恒 穆 晟 编著

上海教育出版社出版发行

(上海永福路123号)

各地新华书店经销 江苏太仓印刷厂印刷

开本 787×1092 1/32 印张 7.25 插页 2 字数 134,000

1987年5月第1版 1987年5月第1次印刷

印数 1-9,400本

统一书号: 7150·3815 定价: 0.98元

前 言

地球周围充满着空气，地球上有浩瀚的海洋，有日夜奔腾的江河大川，有千姿百态的美丽湖泊。水的面积约占地球表面积的四分之三。空气和水有着共同的特性——容易流动，因此人们称它们为流体。从这个意义上说，人类生活在流体的世界中。

大家都知道，空气和水是人们生活和生存的必要条件。它们有着自己的特性及运动规律，对它们的特性与运动规律作深入的分析研究，不但可以对一些人们常见到的自然现象作出科学的解释，还可以自觉地利用这些规律改造自然来为人类服务。譬如，在日常生活中，人们常常会遇到这样一些问题：飞机为什么能在空中飞行，支持它升在空中与它重力相平衡的那股力是哪里来的；架空电线为什么有时会发出嗡嗡的声音；卡车行驶时，为什么它的后面会形成滚滚的泥沙；强风以水平方向吹到倾斜的屋顶上时，屋顶为什么会被向上掀起；……。在这些常见的现象中，有着许多流体力学的道理。

让更多的人认识流体及其作用，了解它的一些基本规律，从而更好地为生产和日常生活服务，这就是编写本书的宗旨。

流体力学是研究流体运动和平衡规律以及流体与固体相互作用的学科。它是在人类征服自然的长期斗争中建立和发展起来的，而它的发展又有力地推动着科学技术和生产的发展。

流体力学可分成流体静力学与流体动力学两部分。而后者内容特别丰富，因此人们常常把流体动力学与流体力学本身等同起来，由于液体与气体存在着一定的差别，液体是不可压缩的，气体是可压缩的，因而流体动力学可分成不可压缩流体动力学和气体动力学（即可压缩流体动力学）。但是，当气流的速度较小时，密度的变化甚微，在这种情况下，人们往往把它作为不可压缩流体来研究和分析，这时所产生的误差可以忽略不计。

连续性方程、伯努利方程、动量定理，这三个方程刻划了流体力学的三个基本规律。在飞机、船舶、汽车、高层建筑以及各种与流体力学有关的工程设计中，都要遵守这些规律。如果人们忽视了这些规律，就可能出现悲剧与事故。1912年，本来是与“奥林匹克”号平行航行的“霍克”号铁甲舰突然撞进了“奥林匹克”巨轮的船舷，就是一个例子。因此，我们一定要牢固地掌握这些规律，让它们在工程技术、日常生活中发挥积极作用，避免事故，减少损失。

我们知道，实际流体的流动是极其复杂的，影响因素是

多种多样的。在某些问题研究中，我们应该突出对该问题起决定作用的主要因素，而忽略起作用不大的次要因素。上面讲过，例如对于速度很低的空气流动，可以忽略其压缩性。在某些问题中，又可以忽略其粘性，用这种方法处理问题，不仅给研究带来很大的方便。而且所得的很多结果与实际流体的流动符合得很好。但是，当研究阻力等这一类问题时，就不能忽略粘性这个因素，在流体力学发展史上，有些科学家曾完全忽略了粘性来研究物体在流体中的运动，竟然得出了没有阻力这一令人迷惑不解的错误结论。

人们都有这样的感受，逆着强风行走，感到很吃力，往往不得不侧着身体前进，这样可以省力不少。尽管水和空气的粘性很小，但在形成阻力上，粘性是起作用的主要因素，而物体的外形也与阻力的大小有极大的关系。粘性流体流动的研究，不仅有理论价值，而且有着实际意义。譬如说，怎样铺设自来水管道及煤气管道，才能减少能量损失；怎样设计飞机、汽车、船舶，才能使它们航行阻力最小；游泳运动员以什么样的姿势游泳最容易提高速度；高尔夫球具有什么样的表面时才能飞得更远。科学地回答和解决这些问题，可以大大地提高工作效率和经济效益。粘性的存在，在流动中常常会形成漩涡。当粘性流体绕流某些物体时，可能会出现卡门涡街现象，这种周期性释放漩涡所引起的物体振动，可致导工程的倒塌和破坏。

随着工业和航空事业的发展，向流体力学提出了一个又一个新的课题，由于要求越来越高的流速，超音速空气动

力学逐渐地形成和发展起来了。当气流的速度达到一定程度时，密度变化这个因素就不能忽略了。而且超音速气流的流动特性与亚音速气流有着本质的区别，在本书中，我们对此作了简略的介绍。

流体力学的产生和发展，是建立在观察和实验的基础上的，在本书的论述过程中，通过试验引出规律，又通过试验进行验证和修正。在最后一章中，专门介绍了风洞及其模型试验。随着科学技术的发展，风洞的用途日益扩大，在非航空方面有着广阔的前景。在风洞中进行模型试验的目的，就是要把从模型试验中得到的结果应用到真实物体上去。为此，必须使模型试验严格地满足一组条件，这就是相似理论要解决的问题。

本书希望能帮助非本专业的读者获得流体力学的一些基本常识以及某些有趣的现象的流体力学的背景。了解有关流体力学的概念、方法和规律，并能有助于读者解决某些简单的问题。

目 录

第一章 流体的属性1

第一节 流体的易流动性1

第二节 流体的粘性2

第三节 流体的密度5

第四节 流体的压缩性7

第二章 流体静力学9

第一节 流体的静压强9

第二节 在重力作用下的 流体平衡.....10

第三节 连通器和压力计.....18

第四节 大气压强和托里 拆利气压计.....24

第五节 帕斯卡原理和水压机.....27

第三章 流体动力学.....29

第一节 迹线、流线与流场.....29

第二节 连续性方程和伯



努利方程.....	33
第三节 基本方程的应用举例...	40
第四节 动量定理.....	51
第四章 管道流动.....	58
第一节 雷诺试验.....	58
第二节 泊肃叶定律.....	63
第三节 沿程阻力.....	67
第四节 局部阻力.....	80
第五章 绕流机翼的流动.....	94
第一节 有关机翼剖面的 几何参数.....	95
第二节 机翼表面压强分布 ...	100
第三节 机翼的空气动力特 性	110
第四节 飞机的飞行	117
第六章 粘性流体绕物体的流动 ...	128

第一节	边界层	129
第二节	边界层分离和压 差阻力	135
第三节	绕流圆柱体的流 动和卡门涡街	142
第四节	绕流圆球的流动 和阻力危机	148
第五节	物体的形状与空 气阻力	155
第七章	超音速流动	160
第一节	音速和马赫数	161
第二节	小扰动源运动的 速度与扰动传播 区域的关系	164
第三节	超音速管道流与 拉伐尔管	168

第四节	激波与膨胀波	184
第五节	飞机的跨音速飞行 突破“音障”	190
第八章	模型试验与风洞	195
第一节	模型试验	195
第二节	模型试验与真实流动之间的关系	200
第三节	低速风洞	206
第四节	风洞的非航空用途	212
第五节	超音速风洞	217

第一章 流体的属性

流体包括液体和气体两种。自然界中的液体是很多的,水、酒精、油及一些化学试剂等;气体有空气、煤气、氧气、氮气和二氧化碳等。最常见的流体是水和空气。

下面介绍流体的属性。

第一节 流体的易流动性

流体很容易流动。高处的水向低处流,直到液面处于同一水平面为止。

一只打足气的轮胎,当打开气阀时,轮胎内的气就会流出来,直到与外界大气压相等为止。

这种情况是与固体不同的,固体有固定的形状,它可以承受一定的外力,当外力不大时,所产生的变形甚微,肉眼难以觉察。而流体则不然,当它受到外力作用(即使很小的外力),就会发生连续不断的变形,直到外力消失为止,这种性质就称为流体的易流动性。由于它容易流动,所以流体

没有固定的形状。

第二节 流体的粘性

流体具有粘性，它表现在当流体内部各层以不同的速度运动时，它们相互之间有摩擦力。流体沿着固体壁面流动时，流体与固体壁之间也存在着摩擦力，例如把水从瓶子中倒出来要比把油从瓶子中倒出来容易得多，这是由于水的粘性要比油小的缘故。对于水和油等液体的粘性，日常生活中都可以观察到，不过，对于空气也具有这种粘性，也许有不少人难以相信。这里，我们不妨做一个试验，如图 1-1

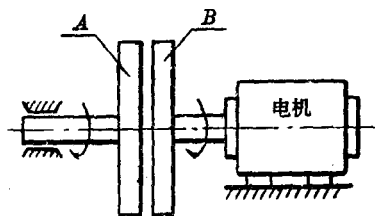


图 1-1 粘性表演仪

所示。两块圆板 A 与 B 平行地放置，中间留有很小的缝隙， B 板与一小电动机相连。开始时， A 与 B 盘都处于静止状态。

随后启动小电动机，

B 盘开始转动，过了一会儿， A 盘也会跟着转动起来，且越转越快，直到 A 盘转速接近 B 盘为止。这就表明空气有粘性，当 B 盘转动时，带动附近一层空气跟着转动，这层空气又带动相邻的一层空气转动，这样一层带动一层，最后带动紧贴着 A 板的一层空气转动，于是这层空气带动 A 板跟着转动起来了。

现在，我们用一个简化的模型——平板试验来进一步讨论流体的粘性与摩擦力之间的关系，如图 1-2。两块相

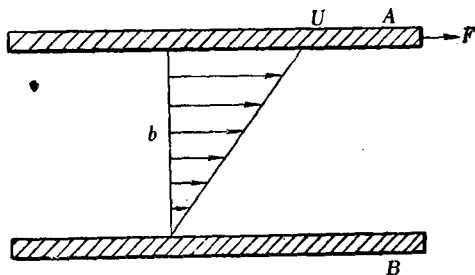


图 1-2 平板粘性验证

距为 b 的平行平板，它们之间充满着某种流体，这两块平板具有足够的长度。让下板 B 静止不动，用力 F 拖动 A 板，使 A 板以速度 U 作匀速直线运动。从试验可以发现，紧贴 A 板的一层流体与 A 板以同样的速度 U 运动，而紧贴 B 板的流体则与 B 板具有同样的速度，即速度为零。当速度 U 不是很大时，两板之间某点 y 处的流体速度 v 满足下列关系：

$$v = \frac{U}{b} y$$

其中 y 为从静止不动的 B 板量起的距离。为了维持 A 板以速度 U 等速运动时所需要的拉力 F 为：

$$F = \mu \frac{U}{b} \cdot A$$

其中， μ 为动力粘度，简称粘度， A 为 A 板的面积。于是单位面积上作用的摩擦力 (τ) 为：

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

以上这个试验叫做牛顿平板试验。

显然, 动力粘度 μ 取决于流体的性质, 而 μ 值的大小表示了流体粘性的大小。它的单位为帕·秒。以往出版的书中常用“泊”、“厘泊”和“微泊”来作为粘度的单位。

$$1 \text{ 泊} = 10^{-1} \text{ 帕} \cdot \text{秒}$$

$$1 \text{ 厘泊} = 10^{-2} \text{ 泊} = 10^{-3} \text{ 帕} \cdot \text{秒}$$

$$1 \text{ 微泊} = 10^{-6} \text{ 泊} = 10^{-7} \text{ 帕} \cdot \text{秒}$$

下面是蓖麻籽油、水和空气的粘度表。

流体 温度(°C)	蓖麻籽油 (帕·秒)	水 $\mu \times 10^3$ (帕·秒)	空气 $\mu \times 10^5$ (帕·秒)
0	5.3	1.781	1.71
20	0.986	1.002	1.81
40	0.231	0.653	1.90
60	0.080	0.466	2.00
80	0.030	0.354	2.09
100	0.017	0.282	2.18

从表上可以看出, 蓖麻籽油的粘度要比水大得多, 而水的粘度又要比空气大得多。以 20°C 为例, 蓖麻籽油的粘度为水的粘度 981 倍, 为空气的粘度的 54500 倍。尽管空气的粘度很小, 但是在研究有关阻力问题时, 却是不可忽略的。

从上表还可看出, 液体的粘度随着温度的升高而降低,

这与我们平时直觉一样；而空气的粘度却是随着温度的升高而增大，这一点我们必须特别注意。有关水和空气的粘度数值随温度变化的详细数据见表 1。

第三节 流体的密度

单位体积内流体的质量称为流体的密度，可用下面的公式来表示：

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1.1)$$

式中 ρ 是流体的密度(千克/米³)；

V 是流体所占的体积(米³)；

m 是流体的质量(千克)。

流体的密度随温度的变化而变化，气体的密度还随压强的变化而变化(见表 1)。

从物理学上知道，大气的密度 ρ 可以从气体状态方程推导出来：

$$\rho = \frac{p_0}{RT_0} \quad (1.2)$$

式中 ρ 为大气密度(千克/米³)；

p_0 为大气压强(帕)；

T_0 为大气绝对温度(K)；

R 为气体常数(牛顿·米/(千克·K))；

对于空气而言， $R=287$ 牛顿·米/(千克·K)。如果知道了当时当地的大气压强和大气温度，便可算出空气的密度。

在表 1 粘度一栏中, 水的粘度下面有 $\times 10^3$ (空气的下面有 $\times 10^5$), 它的意思是表上所给的数值是实际的粘度乘上了 10^3 (对于空气, 乘上了 10^5) 之后的数值。这种列表方法在科技书中是经常见到的, 在使用时要把它反算过来。

表 1 水和空气的密度和粘度
(在一个标准大气压下)

温 度 (°C)	水		空 气	
	密 度 (千克/米 ³)	粘 度 $\mu \times 10^3$ (帕·秒)	密 度 (千克/米 ³)	粘 度 $\mu \times 10^5$ (帕·秒)
0	999.8	1.781	1.293	1.712
5	1000	1.518	1.270	1.737
10	999.7	1.307	1.247	1.761
15	999.1	1.139	1.225	1.785
20	998.2	1.002	1.205	1.809
25	997.0	0.890	1.185	1.833
30	995.7	0.798	1.165	1.857
40	992.2	0.653	1.128	1.903
50	988.0	0.547	1.093	1.949
60	983.2	0.466	1.060	1.994
70	977.8	0.404	1.029	2.039
80	971.8	0.354	1.000	2.083
90	965.3	0.315	0.973	2.126
100	958.4	0.282	0.946	2.168

例如, 从表上查一下 20℃ 时水的粘度与密度。

从表 1 上可查得水在 20℃ 时:

$\mu \times 10^3 = 1.002$ 帕·秒, 所以 $\mu = 1.002 \times 10^{-3}$ 帕·秒。