

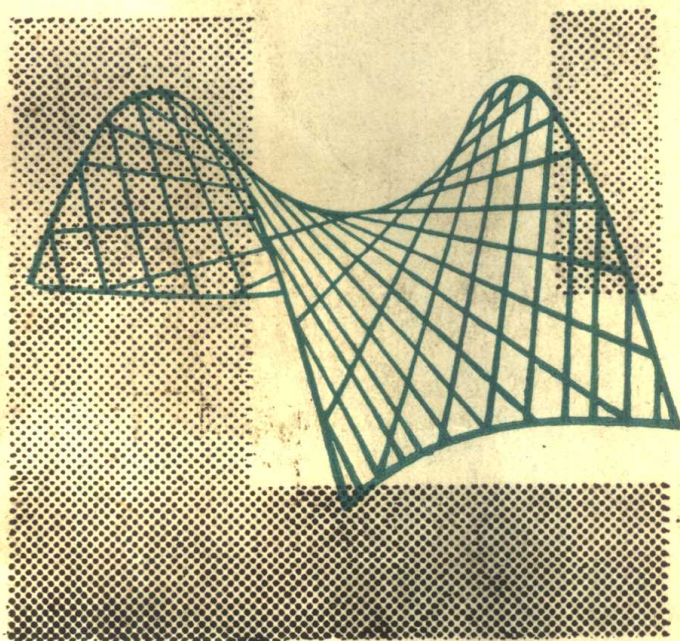
977426

高等学校试用教材

# 流体力学 与流体机械

屠大燕 主编

● 中国建筑工业出版社



035  
744

977426

255  
77070  
+

高等学校试用教材

# 流体力学与流体机械

屠大燕 刘鹤年 马祥瑞 钟济华 合编

屠大燕 主编

中国建筑工业出版社

(京)新登字 035 号

本书是高等工业院校供热通风及空调工程专业和燃气工程专业本科教材,也可供其它相近的专业及有关工程技术人员参考。

全书共十六章。前十二章为流体力学部分,主要内容有:流体静力学、流体运动的有限体分析和微元分析、量纲分析和相似原理、流动阻力和能量损失、不可压缩流体的管道流动、理想不可压缩流体平面无旋流动、边界层理论基础与绕流运动、紊流射流和紊流扩散、一元气体动力学基础等。后四章为流体机械部分,主要内容是:离心式泵与风机的叶轮理论和设备性能、泵与风机的相似律和运行调节等。

本书的体系与我国工业院校多年沿用的体系相比有新风格。编写过程中注重基本理论与基本概念的阐述,力求思路清晰,物理概念明确,各章附有习题,并有部分习题答案。

高等学校试用教材

流体力学与流体机械

屠大燕 刘鹤年 马祥瑞 钟济华 合编

屠大燕 主编

中国建筑工业出版社出版(北京西郊百万庄)

新华书店总店科技发行所发行

北京市顺义县燕华印刷厂印刷

开本: 787×1092毫米 1/16 印张: 24 字数: 581 千字

1994年6月第一版 1994年6月第一次印刷

印数: 1—5,400 册 定价: 11.10 元

ISBN7-112-02183-9/TU·1675

(7203)

## 前 言

本书是为高等工业院校供热通风及空调工程专业和燃气工程专业写的“流体力学与流体机械”本科教材，也可用于其他相近的专业。它是在多年教学实践的基础上，吸收了国内外新出版的有关教材的优点写成的。

本书的编写体系，同我国工科院校多年沿用的体系相比，有较大的变动。主要是：

(1) 把从物体机械运动的普遍规律出发建立的一般形式的基本方程组作为总纲，用它来统帅流体力学的全部内容，其他的方程和原理基本上都是这些基本方程在不同条件下的简化和应用。这样编排的目的是要使读者对流体力学所要解决的问题和解决思路先有一个总的了解。在此基础上再讨论各局部问题，不仅使内容具有更强的系统性，也有助于理解各部分内容的特点及其相互关系。此外，立足于一般形式的基本方程分析具体问题，就能站得高看得远，考虑问题深入、全面。

(2) 所有的欧拉型基本方程一律采用以输运公式为主要手段的控制体分析法来推导。对同一种类型的方程，根据他们的共性采用同一种方法来分析，既可使推导简化，又便于读者能更好地理解用欧拉法描述流体运动的特点。

(3) 将基本方程分为积分形式的和微分形式的两类，指明积分形式的方程用于解决有限体积流体控制面上的流动参数关系问题，微分形式的方程可用来解决流动参数在流场内的分布问题。读者明确认识到这一点，对培养能力是有益的。

(4) 在基本方程中适当地介绍了能量方程。不可压缩流体恒定总流的能量方程（伯诺里方程）是由积分形式的一般能量方程导出的。这一方面使它的名称与来源一致，加强了条理性，另一方面也能使读者进一步提高对能量方程和动量方程的区别与联系的认识。在可压缩流体的流动中，能量方程是不能忽视的，尤其是当涉及到有摩擦的流动时，更是如此。

(5) 流体机械部分在体系上分为叶轮理论、设备性能、运行与调节、其他常用（非离心式）泵与风机四章阐述，加强了基础理论和系统性。

此外，本书还加强了一些具体应用的内容，例如动量方程的应用、势流叠加原理的应用等。

本书由哈尔滨建筑工程学院屠大燕主编，具体编写分工如下：第一、二、三章，钟济华；第四、五、九、十、十二章，屠大燕；第六、七、八章，刘鹤年；第十一章，钟济华、屠大燕；第十三、十四、十五、十六章，马祥瑞。

本书由衡阳工学院汪兴华教授主审。清华大学彦启森教授、湖南大学陈在康教授曾对书稿提出宝贵意见，编者谨向他们表示衷心的感谢。

由于编者水平有限，不妥之处在所难免，恳请批评指正。

# 目 录

第一章 绪论 .....	1
§ 1-1 流体力学的研究对象和任务 .....	1
§ 1-2 流体力学的发展简史 .....	3
§ 1-3 作用于流体上的力 .....	5
第二章 流体的主要物理性质 .....	7
§ 2-1 流体的密度和重度 .....	7
§ 2-2 流体的压缩性和膨胀性 .....	8
§ 2-3 流体的粘性 .....	11
§ 2-4 流体的表面张力和毛细管现象 .....	15
习题 .....	16
第三章 流体静力学 .....	18
§ 3-1 静止流体中应力的性质 .....	18
§ 3-2 流体平衡微分方程及其积分 .....	19
§ 3-3 重力作用下静止液体的压强分布规律 .....	22
§ 3-4 液柱式测压计 .....	27
§ 3-5 液体的相对平衡 .....	30
§ 3-6 液体作用在平面上的总压力和压力中心 .....	34
§ 3-7 液体作用在曲面上的总压力和阿基米德原理 .....	38
§ 3-8 重力场中的大气压分布 .....	44
习题 .....	45
第四章 流体运动的基本概念和有限体分析 .....	53
§ 4-1 描述流体运动的两种方法 .....	53
§ 4-2 质点导数 .....	55
§ 4-3 用欧拉法描述流体运动的基本概念 .....	57
§ 4-4 流动的分类 .....	60
§ 4-5 系统和控制体 输运公式 .....	63
§ 4-6 积分形式的连续性方程 .....	67
§ 4-7 积分形式的能量方程 .....	69
§ 4-8 不可压缩流体恒定总流的能量方程 .....	72
§ 4-9 恒定总流能量方程的物理意义 总水头线和测压管水头线 .....	73
§ 4-10 恒定总流能量方程的应用 .....	76
§ 4-11 不可压缩流体非恒定总流的能量方程 .....	84
§ 4-12 积分形式的动量方程和动量矩方程 .....	86
§ 4-13 动量方程和动量矩方程的应用 .....	88
习题 .....	99
第五章 流体运动的微元分析 .....	107

§ 5-1	连续性微分方程	107
§ 5-2	运动微分方程——微分形式的动量方程	110
§ 5-3	边界条件和初始条件	115
§ 5-4	流体的速度分解定理	117
§ 5-5	有旋流动和无旋流动	122
§ 5-6	理想不可压缩流体运动微分方程的积分	130
	习题	134
<b>第六章</b>	<b>量纲分析和相似原理</b>	137
§ 6-1	量纲分析的意义和量纲和谐原理	137
§ 6-2	量纲分析法	139
§ 6-3	相似理论基础	144
§ 6-4	模型试验	150
	习题	153
<b>第七章</b>	<b>流动阻力和能量损失</b>	156
§ 7-1	流动阻力与水头损失的两种型式	156
§ 7-2	粘性流体的两种流动状态	157
§ 7-3	均匀流的切应力关系式	161
§ 7-4	圆管中的层流运动	162
§ 7-5	紊流运动与时均法	165
§ 7-6	紊流的沿程水头损失	171
§ 7-7	非圆管的沿程损失	181
§ 7-8	局部损失	182
	习题	190
<b>第八章</b>	<b>不可压缩流体的管道流动</b>	194
§ 8-1	简单管道	194
§ 8-2	复杂管道	198
§ 8-3	管网计算基础	202
§ 8-4	有压管道中的水击	207
	习题	212
<b>第九章</b>	<b>理想不可压缩流体平面无旋流动</b>	217
§ 9-1	平面流动及其流函数 流网	217
§ 9-2	几种基本的平面势流	221
§ 9-3	势流叠加举例	226
§ 9-4	圆柱体的绕流	233
§ 9-5	求解平面势流的虚像法	239
	习题	244
<b>第十章</b>	<b>边界层理论基础与绕流运动</b>	247
§ 10-1	边界层概念	247
§ 10-2	边界层微分方程	249
§ 10-3	边界层的动量积分关系式	251
§ 10-4	平板边界层的近似解	254
§ 10-5	曲面边界层及其分离现象	261

§ 10-6 绕流运动 .....	263
习题 .....	268
第十一章 紊流射流和紊流扩散 .....	270
§ 11-1 紊流射流的结构及基本特性 .....	270
§ 11-2 紊流射流主体段的运动分析 .....	273
§ 11-3 温差射流和浓差射流 .....	277
§ 11-4 紊流射流的其它计算方法 .....	281
§ 11-5 紊流扩散的基本方程 .....	283
习题 .....	289
第十二章 一元气体动力学基础 .....	291
§ 12-1 小扰动波的传播速度——音速 马赫数 .....	291
§ 12-2 一元恒定气流的基本方程 .....	294
§ 12-3 变截面喷管中等熵流动各参数沿程的变化 .....	299
§ 12-4 等截面管道中实际气体的恒定流动 .....	302
习题 .....	310
第十三章 离心式泵与风机的叶轮理论 .....	312
§ 13-1 概述 .....	312
§ 13-2 离心式泵与风机的工作原理与性能参数 .....	314
§ 13-3 流体在叶轮中的运动 .....	315
§ 13-4 离心式泵与风机的基本方程 .....	316
§ 13-5 理论能头的组成 .....	319
§ 13-6 叶轮型式对能头的影响 .....	320
习题 .....	322
第十四章 离心式泵与风机的设备性能 .....	323
§ 14-1 离心式泵与风机的理论性能曲线 .....	323
§ 14-2 泵与风机的损失与效率 .....	324
§ 14-3 泵与风机的实际性能曲线 .....	326
§ 14-4 泵与风机的相似律 .....	328
§ 14-5 风机的无量纲性能曲线 .....	331
§ 14-6 泵与风机的比转数 .....	333
§ 14-7 水泵的气蚀性能 .....	335
习题 .....	339
第十五章 泵与风机的运行与调节 .....	341
§ 15-1 管路性能曲线与工况点 .....	341
§ 15-2 泵或风机的联合运行 .....	342
§ 15-3 泵与风机的工况调节 .....	345
§ 15-4 离心泵的选择 .....	351
§ 15-5 离心式风机的选择 .....	353
习题 .....	355
第十六章 其它常用泵与风机 .....	357
§ 16-1 轴流式泵与风机 .....	357
§ 16-2 活塞泵 .....	360

§ 16-3 水环式真空泵 .....	362
习题 .....	363
<b>附录</b> .....	364
附录A 应力和变形速率的关系 .....	364
附录B 比摩阻计算表 .....	366
附录C 离心泵性能曲线 .....	367
附录D 离心泵综合性能图 .....	368
附录E 风机的无量纲性能曲线 .....	369
附录F 风机的选择性能曲线 .....	369
附录G 4-72-11型风机性能表 .....	370
附录H 风机的传动方式 .....	370
附录I 风机出口位置 .....	371
附录J 轴流式风机的机翼型代号 .....	371
附录K 部分习题答案 .....	371



# 第一章 绪 论

## § 1-1 流体力学的研究对象和任务

流体力学是研究流体的机械运动规律，以及运用这些规律解决实际工程问题的一门学科。从上述定义可知，流体力学的研究对象就是流体。流体包括液体和气体。因此，研究流体运动规律的学科可分为两支：以液体为主要研究对象的水力学、流体力学和以气体为主要研究对象的空气动力学、气体动力学。由于液体与气体既有共性，又有各自的特性，所以这几门学科既有一些共同的基本理论，又有各自的专门问题与方法。

流体区别于固体的基本特征是流体有流动性。所谓流动性就是流体在静止时不能承受剪切力的性质。当有剪切力作用于流体时，流体便产生连续的变形，也就是流体质点之间产生相对运动。流体也不能承受拉力，它只能承受压力。流动性使小范围内液体的自由表面保持水平，这是众所周知的自然现象。流动性使流体的运动具有下列特点：

第一，流体没有固定的形状，它的形状是由约束它的边界形状所决定的。不同的边界必将产生不同的流动。因此，与流体接触的周围物体的形状和性质（也就是边界条件）对流体的运动有着直接的影响。

第二，流体的运动又和流体的变形联系在一起。当流体运动时其内部各质点之间有着复杂的相对运动。所以流体的运动又是和它的物理力学性质有密切的关系。物理性质不同的流体，即使其边界条件相同也会产生不同的流动。

自然界中出现的各种流动虽然千变万化，各有不同。但是，无论现象多么复杂，每个具体的流动，都是由流体本身的物理性质（这是内因）和流动所在的外界条件（这是外因）这两个因素所决定的。流体力学中所要探讨的运动规律，实质上就是要研究流体的物理性质和流动的边界条件对流体运动所产生的作用和影响。

不仅流体的运动如此，自然界中一切物体的运动也都是决定于其内因和外因，只是形式有所不同而已。如果我们不从事物内部的矛盾关系上，以及这事物与它事物的相互联系和相互影响上去研究事物的发展变化，那就不可能真正了解事物发展变化的必要条件和根据，也就不可能求得事物运动的规律。

质量守恒定律和能量守恒定律是自然界中一切物质运动都必须遵循的普遍规律。流体作为物质的一种形态，必然也服从这些规律。另外，流体力学是研究流体宏观机械运动的学科。而牛顿的力学定律，以及根据它导出的动量定理、动量矩定理、动能定理等，都是物体宏观机械运动应遵循的一般规律。因此，流体力学中的基本规律实质上就是将上述的普遍规律和一般规律应用于流体上，并考虑流体有流动性的特点而得到的。

不同物质形态的物体，具有不同的物理力学性质，因而它们的运动又都各有其特殊性，各自遵循不同的规律。所以力学的各个分支又各有其独特的理论体系。但是，当不同物质形态的特性不能显示其区别时，不同形态的物体在运动规律上的差别也就消失了。例

如，液体和气体是有差别的：气体易于压缩，液体不易压缩；气体一定充满容纳它的空间，没有自由表面；液体可以不充满容器，有自由表面。因此一般情况下液体和气体的运动规律不完全相同。但是当气体的速度远比音速小时，气流的密度变化很小，气体的压缩性实际上可以忽略（例如在标准状态下如果气流速度不超过60m/s，则不考虑压缩性所引起的相对误差不大于1%）。这样，对于不可压缩流体得出的运动规律，完全适用于气体。无数事实证明以上结论的正确性。

**流体的连续介质模型：**众所周知，任何物体都是由不断运动着的分子组成的，分子之间有空隙。所以从微观角度看，流体并不是一种连续分布的物质。但是工程实践中要求流体力学解决的问题，一般都具有较大的尺寸，而分子之间的距离（例如1cm<sup>3</sup>的空气含有 $2.7 \times 10^{19}$ 个分子）同工程尺寸比较是极其微小的。因此，流体力学可以不去研究微观的分子运动，而只研究流体表现出来的平均力学性质就行了。由于流体力学研究的是流体的宏观机械运动，所以在流体力学中可以把流体看成是由无数流体微团（或称质点）充满的、内部无空隙的连续体，或称为连续介质。这就是流体的连续介质假设（或模型）。这里所说的流体微团，是指这样小的一团流体，它的大小和流动的任何特征尺寸相比是微不足道的（可看作一个点），但比分子间距离又大得多。每个微团含有为数众多的分子，从而使我们能用统计平均方法来考察流体的宏观物理量（如压强、速度、密度、温度等），以及它们的变化。

引入了连续介质这个假设，就可不考虑复杂的分子运动，而只考虑流体在外力作用下的机械运动。同时还可进一步认为：表征流体运动和性质的各物理量在空间是连续分布的，从而把连续函数的概念引入到流体力学中来。这样，就可以利用数学分析这一有力的工具来研究流体的运动规律。

并不是任何情况都可将流体看作为连续介质的。例如在研究高空飞行问题时，空气非常稀薄，流体分子间距离与工程尺寸相比不是微不足道的了，那时就不能再把空气看作是连续介质了。

流体力学虽然主要研究流体的机械运动，但自然界的一切事物都是相互联系的，单纯的机械运动是不存在的，尤其是气体的机械运动，总是和热运动分不开的，流体力学只不过着重从机械运动的角度来研究而已。

流体力学在工程建设和工业生产中的应用非常广泛。例如重工业中的冶金、电力、采矿等工业，轻工业中的化工、纺织、造纸工业，交通运输业中的飞机、船舶设计，以及农田灌溉、水利建设、河道整治等工程中，无不有大量的流体力学问题需要去解决。在土建工程和环境工程中，如给水排水、供热通风、燃气供应等工程，都要对水或其他流体进行净化或加热等处理，以及通过管道或渠道输送给用户或车间，在其设备和系统的设计、运行管理及施工中也会遇到一系列的流体力学问题需要解决。在评价废水、废气对环境污染的影响，设计铁路或公路的桥梁、路基排水、隧洞通风等设施时，也需要用到很多流体力学的知识。因此，流体力学是土建、环境工程类大多数专业教学计划中的一门重要的专业基础课。上述各专业的科技人员必须很好地掌握流体力学的基础知识，才能作好各自的岗位工作，为人民服好务。

## § 1-2 流体力学的发展简史

流体力学与其他学科一样，是人类在生产实践和与自然作斗争中逐渐发展起来的。流体力学形成和发展的历史可分四个阶段。

第一阶段 流体力学形成的萌芽阶段（16世纪以前的时期）。

水和空气是人类在生活和生产中接触频繁的物质。远在原始社会，人类已开始利用河、湖作为交通的途径。随着氏族社会由渔猎逐渐发展到以农业为经济基础的时代，为了保证农业生产，人类开始了与洪水作斗争和利用水的活动。当时在防洪、灌溉、排水和水力的利用等方面，出现了不少原始的工程和创造。随着生产力的不断发展，这些工程的规模在不断扩大，复杂程度也在不断提高，显示了当时人类对水流的性质已有初步的认识。不过，这些知识往往都停留在直接经验阶段，还缺乏科学的概括，因而未能总结成系统的理论。

最早的流体力学理论是公元前250年左右由希腊哲学家阿基米德（Archimedes 287—212 B.C.）提出的《论浮体》，它至今仍是流体静力学的一个重要的组成部分。但此后长达17世纪之久，流体力学未见有重大的进展。当时正是封建生产方式在世界范围内占统治地位的时期。由于封建制度的统治和神权思想的束缚，生产力发展缓慢，自然科学的发展受到了很大的限制。直到15世纪后期，在由意大利开始的文艺复兴时期，流体力学发展的停留局面才被打破。公元1500年意大利物理学家和艺术家达·芬奇（Da Vinci 1452~1519）提出了《论水的运动和水的测量》一文，并导出了不可压缩流体的质量守恒方程。可惜他的著作到19、20世纪才发现，因此对推动流体力学的发展未能起到重大的作用。

总的看来，在16世纪以前，近代的自然科学还未形成。人类对自然界的认识，还只是些直观的轮廓，以及和哲学混在一起的概念。流体力学还没有具备发展成一门独立科学的条件。但是人类在长期生产实践中积累的丰富经验，却为流体力学的发展打下了感性认识的基础。

第二阶段 流体力学奠定了作为一门独立科学的基础阶段（由16世纪中叶到18世纪中叶）。

中世纪后期，资本主义生产关系在封建社会内部生产力发展的基础上逐渐成长起来。尤其是地理大发现以后，欧洲资产阶级开始了掠夺殖民地的活动，同时也给新兴资产阶级开辟了海外市场，因而带来了欧洲工商业和航海事业的空前繁荣。随着生产力的发展和技术的进步迫切需要发展自然科学。在这种形势下，流体力学也迅速地发展起来。

由16世纪末叶到17世纪中叶是这一阶段的前期。在这时期，由于人们还未找到力和运动之间的普遍联系，尚未发现数学分析的方法，所以当时的一些成就都偏重于流体静力学方面。

由17世纪中叶到18世纪中叶是这一阶段的后期。1687年牛顿（I. Newton 1642~1727）提出了著名的力学定律，奠定了物质机械运动的理论基础。大致同时创立的微积分原理，也为流体力学的发展提供了必要的条件。1738年瑞士物理学家伯诺里（D. Bernoulli 1700~1782）在他写的《水动力学》一书中首次系统地阐明了水动力学的一些基本概念，并用能量原理解决了一些流动问题。1755年瑞士数学家欧拉（L. Euler 1707~1783）在

他的著作《流体运动的一般原理》中建立了理想流体运动微分方程式。他首先应用数学分析方法研究流体力学问题，为理论流体力学的发展开辟了新的道路。这些成就为流体动力学奠定了基础。

第三阶段 流体力学沿着古典流体力学和水力学两条道路发展的阶段（由18世纪中叶到19世纪末）。

欧拉提出的不考虑流体内部摩擦阻力的理想流体，是一种经过简化的抽象的流体。只有在摩擦阻力很小的流动中，由这个方程求得的解答才能较好地符合实际。否则，理论得到的结果甚至可能是荒谬的。到19世纪，急剧发展的工程技术又向流体力学提出了许多用理想流体无法解决的问题。在这种情况下，1826年法国工程师纳维埃（L.M.H. Navier 1785~1836）首先提出了考虑流体内部摩擦阻力的粘性流体运动微分方程。此后，很多人致力于研究该微分方程的数学解答。这些研究大大丰富了流体力学的内容，逐渐形成现在的所谓古典流体力学。

粘性流体运动微分方程虽然考虑了摩擦阻力，但它的形式比较复杂，只有在极简单的情况下才能求得解答。但是，当时迅速发展的生产又向流体力学提出了一系列问题，要求解决。于是人们不得不求助于实验，以便根据工程总结与模型试验来解决工程技术问题。水力学就是这样逐渐形成的。水力学是在伯诺里成就的基础上，利用大量的实验资料，来解决那些在古典流体力学中无法解决的问题的。

在当时条件下，流体力学沿着古典流体力学和实用水力学两个方向发展，是为了适应生产发展的需要，因而是必然的。这也大大推动了实验技术的发展。但后来这一对孪生的学科却处于严重分离状态。这种理论和实践的脱节，在这个阶段的后期阻碍了流体力学的发展。

第四阶段 发展成为近代流体力学的阶段（由19世纪末到现在）。

19世纪是资本主义工业发展的重要阶段。由英国开始的工业革命，到19世纪末在欧美等资本主义国家已接近完成。资本主义大机器生产的建立不仅引起生产上的大革命，同时也要求科学技术的巨大进步，以适应生产发展的需要。但是，在此以前的自然科学界都处在形而上学观点和方法的束缚之中。古典流体力学与水力学的长期分离也正是这种观点的反映。到19世纪，由于生产的发展，人们开始与更广泛的自然现象接触。逐渐发现自然界的事物是发展变化的，不同事物之间是互相联系和可以转化的，因而开始用发展变化的眼光来考察问题。19世纪70年代，恩格斯（F. Engels 1820~1895）写了《自然辩证法》，大大地帮助了自然科学从形而上学和唯心主义的束缚中解放出来，为自然科学的迅速发展奠定了坚实的基础。

在上述的历史背景下，从19世纪后期开始，流体力学以空前的速度蓬勃地发展起来。流体力学在这一阶段的发展有以下两个特点：

（1）理论与实验密切结合，大大促进了流体力学的发展速度。

19世纪后期，以数学分析为主要研究工具的古典流体力学和以实验为主要研究方法的实用水力学有了互相接近的趋势。英国人雷诺（O. Reynolds 1842~1912）于1882年首先阐明的相似原理，大大提高了对实测资料进行理论概括的能力，从而加速了理论与实验的结合。雷诺以后，实验技术有了很大提高，实验的作用也有所扩大。研究流体运动的实验室（水力学实验室和空气动力学实验室）陆续建立。水力学实验由以现场进行的实物观

测为主，逐渐发展为实物观测与模型试验并重。实验的目的也不像先前那样局限于解决工程具体问题，同时还加强了对基本理论的验证和基本规律的寻求。理论和实验的密切结合，是近代流体力学迅速发展的重要因素。

(2) 理论与生产实践的密切联系，使流体力学的研究领域不断扩大，出现了很多新的分支。

这一阶段的最重要特点还在于理论与生产实践的紧密联系。流体力学逐渐广泛地应用于生产实践。在生产实践的推动下，大大丰富了流体力学的内容。流体力学的研究领域不断扩大，出现了许多新的分支。

近代流体力学的发展，首先是和本世纪航空事业的蓬勃兴起分不开的。例如平面势流理论、机翼理论、螺旋桨理论和附面层理论等，都是在航空事业的推动下发展起来的。其中德国人普朗特(L. Prandtl 1875~1953)于1904年首先提出的附面层理论，对进一步推动流体力学与生产实践的联系起了重大的作用。其他如与多方面问题有关的紊流理论，与高速飞行和涡轮机制造有关的气体动力学理论等，本世纪以来都获得了巨大的成就。40年代以来，由于超高速飞行、火箭技术、原子能利用、电子计算机等尖端技术以及其他新兴工业的发展，给流体力学提出了许多新的课题，大大开拓了流体力学的研究领域，促使一些流体力学新分支的诞生，如电磁流体力学、化学流体力学、计算流体力学、非牛顿流体力学、多相流体力学等。这些新分支一般都具有边缘科学的性质。流体力学正越来越多地和其它有关的科学结合，这正是人们的认识由简单到复杂，逐渐认识到物质的不同运动形式之间的相互联系和转化关系的结果。

我国在防止水害和运用水利方面有着悠久的历史。早在公元前的秦朝，就兴修了著名的都江堰。这一灌溉系统经历了二千多年，至今仍在发挥效益。东汉初杜诗制造了水排，就是利用山溪水流驱动鼓风机，用于炼铁。这可以说是近代水力机械的先驱。古代计时工具——铜壶滴漏的出现，说明当时对孔口出流的规律已有了定量的认识。只是由于西方国家进入资本主义社会后，我国在这一长时期内仍处于封建统治之下，阻碍了生产及科学技术的发展，致使我国在流体力学发展成为一门严密的学科的关键时期，未能作出应有的贡献。

中华人民共和国成立以来，生产建设取得了巨大成就，科学技术发展空前繁荣。结合电站、灌溉、造船、航运、石油开采、城市建设、环境保护……等工程和工业建设的需要，人们对流体力学进行了大量的理论和实验研究，获得了很多重要的成果。现在国内外已有不少华夏子孙，以其在流体力学方面的卓越成就，跻身于当今世界著名学者之列。随着我国社会主义现代化建设事业的进一步发展，党的改革开放政策的进一步贯彻落实，我国的流体力学工作者必将为流体力学的发展作出更大的贡献。我们也寄希望于本书的青年读者。

### § 1-3 作用于流体上的力

研究流体运动的规律必然要从分析作用于流体上的力着手。若在所研究的流体中任取一小块流体 $A$ ，并把它作为隔离体来看。外界作用于这块流体上的力按其作用方式不同只有这样两类：表面力和质量力。

表面力 周围流体通过直接接触而作用于 $A$ 表面上的力称为表面力。由于表面力分布在 $A$ 表面上,所以表面力要用应力来度量。如图1-1,在 $A$ 的表面上任选一 $a$ 点,在其周围取一包含 $a$ 点在内的微元面积 $\Delta A$ 。以 $\Delta F_s$ 表示作用在 $\Delta A$ 上的表面力,  $\Delta F_s$ 通常与 $\Delta A$ 斜交。

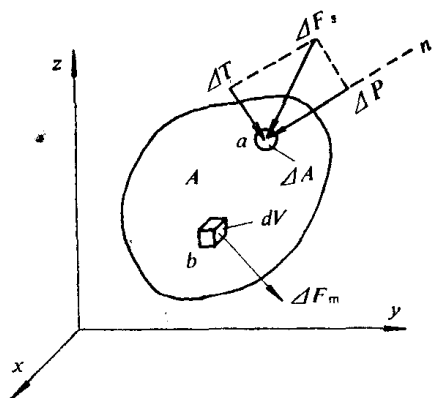


图 1-1 表面力和质量力

流体力学中为了今后研究方便,一般把 $\Delta F_s$ 分解为两个分力:沿 $\Delta A$ 法线方向的 $\Delta P$ 和沿切线方向的 $\Delta T$ 。由于流体不能承受拉力, $\Delta P$ 一定指向 $\Delta A$ 的内法线方向。故一般称 $\Delta P$ 为压力,而 $\Delta T$ 为切向力。比值 $\Delta P/\Delta A = \bar{p}$ 是度量 $\Delta A$ 面上压力强度的量,称为 $\Delta A$ 上的平均压强。如表面力均匀分布在作用面上,则 $\bar{p}$ 与 $\Delta A$ 的大小及位置无关。但一般情况下表面力是不均匀分布的, $\bar{p}$ 值将随 $\Delta A$ 的大小和位置而变。为了精确表示 $a$ 点的压力强度,可将 $\Delta A$ 缩小到趋近于零,这样,比值 $\Delta P/\Delta A$ 的极限即能准确地度量 $a$ 点的压力强度。故以

$$p = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta P}{\Delta A} \quad (1-1)$$

来定义流体中某一点的压力强度, $p$ 简称为压强。

同理,当 $\Delta A$ 趋近于零时,比值 $\Delta T/\Delta A$ 的极限即为度量 $a$ 点切向力强度的量。所以

$$\tau = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta T}{\Delta A} \quad (1-2)$$

作为流体中某一点切向力强度的定义。 $\tau$ 简称为切应力

在国际单位制(SI)中,力的单位用牛顿(N),面积的单位用平方米( $m^2$ ),所以压强或切应力的单位用帕斯卡( $1Pa = 1N/m^2$ )。在工程单位制中,力用公斤力(kgf),面积用平方厘米( $cm^2$ ),压强或切应力的常用单位为 $kgf/cm^2$ 。

质量力 作用在所取流体 $A$ 的每个质点上,并与 $A$ 的质量成正比。这种力称为质量力。重力就是最常见的质量力。又如流体作加速运动时,根据达朗伯尔(D'Alembert)原理虚加于流体质点上的惯性力,也是质量力。

作用于流体上的质量力通常用单位质量力来度量。如在 $A$ 中围绕 $b$ 点取一微元体积 $\Delta V$ ,作用于其上的质量力为 $\Delta \vec{F}_m$ 。则作用 $b$ 处单位质量上的质量力为:

$$\vec{f} = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{F}_m}{\rho \Delta V}$$

对于均质流体,因质量与体积成正比,所以质量力也称为体积力。均质流体的单位质量力为:

$$\vec{f} = \frac{\vec{F}_m}{\rho V} \quad (1-3)$$

式中 $\vec{F}_m$ 为作用于流体 $A$ 上的质量力, $\rho$ 为流体密度, $V$ 为流体 $A$ 的体积。

在笛卡尔坐标系中,单位质量为 $\vec{f}$ 在三个坐标轴方向的分量 $f_x$ 、 $f_y$ 、 $f_z$ 分别为

$$f_x = \frac{F_{mx}}{\rho V}, f_y = \frac{F_{my}}{\rho V}, f_z = \frac{F_{mz}}{\rho V} \quad (1-4)$$

单位质量力及其分量的单位是 $m/s^2$ ,与加速度的单位相同。

## 第二章 流体的主要物理性质

既然自然界中的各种流动都是由流体本身的物理性质和流体所在的外界条件所决定的，在研究流体运动规律之前，有必要先介绍影响流体机械运动的主要物理性质。它们是流体的密度、重度、压缩性和膨胀性、粘滞性、表面张力。

### § 2-1 流体的密度和重度

流体和其他物体一样，具有质量和重量。质量的存在使流体运动时具有惯性；而重量则使流体有从高处流向低处的趋势。

单位体积流体所具有的质量称为密度，通常用 $\rho$ 表示。如均质流体的体积为 $V$ ，质量为 $M$ ，则其密度为

$$\rho = \frac{M}{V} \quad (2-1)$$

对于非均质流体，各点的密度不同。要确定空间某点流体的密度，可在该点周围取一微元体积 $\Delta V$ ，若它的质量为 $\Delta M$ ，则该点的密度为

$$\rho = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta M}{\Delta V} = \frac{dM}{dV} \quad (2-2)$$

单位体积流体所具有的重量称为重度，通常用 $\gamma$ 表示。如体积为 $V$ 的均质流体的重量为 $G$ ，则该流体的重度为

$$\gamma = \frac{G}{V} \quad (2-3)$$

非均质流体的重度为

$$\gamma = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta G}{\Delta V} = \frac{dG}{dV} \quad (2-4)$$

在国际单位制中，密度的单位为 $\text{kg}/\text{m}^3$ 、重度的单位为 $\text{N}/\text{m}^3$ 。在工程单位制中，密度的单位为 $\text{kgf} \cdot \text{s}^2/\text{m}^4$ ，重度的单位为 $\text{kgf}/\text{m}^3$ 。

由于重量等于质量乘以重力加速度 $g$ ，所以密度和重度有下列关系：

$$\gamma = \rho g \quad (2-5)$$

物理学中将物体的密度 $\rho$ （或重度 $\gamma$ ）与 $4^\circ\text{C}$ 时蒸馏水的密度 $\rho_w$ （或重度 $\gamma_w$ ）之比称为比重 $S$ ，即

$$S = \frac{\rho}{\rho_w} = \frac{\gamma}{\gamma_w} \quad (2-6)$$

显然， $4^\circ\text{C}$ 时水的比重为1；而水银的比重一般采用 $S_{*} = 13.6$ 。比重是一个无量纲量，切勿与重度混淆。

表2-1中给出了几种常用流体的密度和重度。其中下列数值在今后做题时经常用到，

常用流体的密度和重度

表 2-1

流 体 名 称	温 度 (°C)	密 度 (kg/m <sup>3</sup> )	重 度 (N/m <sup>3</sup> )
蒸 馏 水	4	1000	9807
海 水	15	1020~1030	10000~10100
普 通 汽 油	15	700~750	6860~7350
石 油	15	880~890	8630~8730
润 滑 油	15	890~920	8730~9030
酒 精	15	790~800	7750~7840
水 银	0	13600	133400
熔 化 生 铁	1200	7000	68600
空 气	0	1.293	12.68
氧	0	1.429	14.02
氮	0	1.251	12.28
氢	0	0.0899	0.881
一 氧 化 碳	0	1.25	12.27
二 氧 化 碳	0	1.976	19.40
二 氧 化 硫	0	2.927	29.1
水 蒸 汽	0*	0.804	7.88

\* 为便于计算推算到0°C。

初学者牢记它们将是有益的。

常温下水的密度和重度一般采用：

SI制  $\rho_w = 1000 \text{ kg/m}^3$ ,  $\gamma_w = 9807 \text{ N/m}^3$

工程单位制  $\rho_w = 102 \text{ kgf} \cdot \text{s}^2/\text{m}^4$ ,  $\gamma_w = 1000 \text{ kgf/m}^3$

标准大气压下290°K干空气的密度和重度在SI制为  $\rho_a = 1.20 \text{ kg/m}^3$ ,  $\gamma_a = 11.77 \text{ N/m}^3$ 。

## § 2-2 流体的压缩性和膨胀性

一般说来，流体的密度和重度随温度和压强的改变而变化，这是由于流体内部分子间距离改变引起的。温度升高可使流体分子间距增大，体积膨胀，密度变小；压强增加可使流体分子间距减小，体积压缩，密度变大。但气体和液体其压缩性和膨胀性差别很大。液体的压缩性和膨胀性都很小，除少数特殊情况外，通常把液体当作为不可压缩流体，即认为其密度或重度不随温度和压强而变。气体的压缩性和膨胀性比液体大得多，无论是温度还是压强，对气体密度的影响一般都应予考虑，所以通常将气体视为可压缩流体，认为气体的密度（或重度）是温度和压强的函数。

### 一、液体的压缩性和膨胀性

液体的压缩性通常用压缩系数 $\beta_v$ 来表示。它的定义是：当压强增加一个单位时液体体积的相对减小值。设 $V$ 为液体原有体积，如压强增加 $d p$ 后，体积减小 $d V$ ，则压缩系数为

$$\beta_v = -\frac{1}{V} \frac{dV}{dp} \quad (2-7)$$

$\beta_v$ 的单位是压强单位的倒数，即 $\text{m}^2/\text{N}$ 。由于压强增大时液体体积必然减小，式中 $dV/dp$



永为负值，故于右侧加一负号，以保持 $\beta_v$ 为正。

流体被压缩前后，其质量 $\rho V$ 没有改变。因而 $d(\rho V) = \rho dV + V d\rho = 0$  或  $\frac{dV}{V} = -\frac{d\rho}{\rho}$ 。故压缩系数也可写成

$$\beta_v = \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{d\rho} \quad (2-8)$$

流体受压后体积缩小，但压强撤除后还能恢复到原有状态，故压缩性也可用弹性模量 $E$ 来表示。压缩系数的倒数即为弹性模量：

$$E = \frac{1}{\beta_v} = -V \frac{d\rho}{dV} = \rho \frac{d\rho}{d\rho} \quad (2-9)$$

显然， $E$ 的单位与压强的单位相同，即 $N/m^2$ 。表2-2列举了水在 $0^\circ C$ 时不同压强下的压缩系数。表中压强单位为工程大气压的符号（ $1at = 98070 N/m^2$ ）。

水的压缩系数

表 2-2

压强(at)	5	10	20	40	80
$\beta_v \times 10^6 (m^2/N)$	0.538	0.536	0.531	0.528	0.515

液体的膨胀性一般用体积膨胀系数 $\beta_t$ 来表示。它的定义是在一定压强下温度增高 $1^\circ C$ 时体积的相对变化，即

$$\beta_t = \frac{1}{V} \frac{dV}{dT} \quad (2-10)$$

表2-3给出了一个大气压下不同温度时水的膨胀系数。

水的膨胀系数

表 2-3

温度( $^\circ C$ )	1~10	10~20	40~50	60~70	90~100
$\beta_t \times 10^4 (1/^\circ C)$	0.14	0.15	0.42	0.55	0.72

可见，水的压缩性和膨胀性都很小。压强升高一个大气压，水的体积减小率约为二万分之一。所以一般情况下，水的压缩性和膨胀性可以忽略不计。但是，压缩性或膨胀性的大或小是相对的，对于不同问题其影响有所不同。例如水管阀门突然关闭时所发生的水击现象，就必须考虑水的密度随压强的变化；又如自然循环的热水采暖系统，也必须考虑水的重度随温度的变化，否则就无法解释一些现象并进行计算。

为了便于应用，表2-4中列举了一个大气压下水在不同温度时的重度和密度。

## 二、气体的压缩性和膨胀性

完全气体的状态方程表达了一般情况下气体的密度随温度与压强而变的函数关系

$$\frac{p}{\rho} = RT \quad (2-11)$$

式中 $p$ 为气体的绝对压强（ $N/m^2$ ）； $\rho$ 为气体的密度（ $kg/m^3$ ）； $T$ 为气体的绝对温度