

7B126

226

工程流体力学

詹德新 王家楣 编著



A0976286

湖北科学技术出版社

图书在版编目(CIP)数据

工程流体力学/詹德新主编. —武汉:湖北科学技术出版社, 2001. 10

ISBN 7-5352-2716-3

I. 工… II. 詹… III. 工程力学:流体力学
IV. TB126

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 064736 号

工程流体力学

© 詹德新 王家楣 编著

责任编辑:李海宁

封面设计:王 梅

出版发行:湖北科学技术出版社
地 址:武汉市武昌黄鹄路 25 号

电话:86782508
邮编:430077

印 刷:京山县印刷厂

邮编:431800

850mm×1168mm 32 开 10.5 印张
2001 年 10 月第 1 版

256 千字
2001 年 10 月第 1 次印刷

印数:1-4 065
ISBN7-5352-2716-3/TB·31

定价:18.00 元

本书如有印装质量问题 可找承印厂更换

前 言

流体力学是一门古老而年轻的学科,其应用范围非常广泛,是工程类诸专业中一门重要的技术基础课。根据我们以往的教学经验,学生初次学习流体力学课程,普遍反映有较大的困难,特别是随着工程流体力学教学时数的调整,这一问题更加突出。为了较好地解决这一问题,在我校使用多年的校内教材《流体力学和空气动力学》(王献孚编著)的基础上,我们编写了学时数为 30~40 学时,适合工科院校热能动力、机械设计等专业的教材。

本书共分八章,内容包括流体属性及流体静力学、流体运动学、流体动力学、粘性流体一元管流、流体孔口出流与缝隙流动、粘性流体绕物体流动、相似理论与量纲分析、可压缩气体动力学基础。其中第五章流体孔口出流与缝隙流动是为液压传动专业而写,第八章可压缩气体动力学基础是为热能动力装置(内燃机)专业而写。教师在使用过程中,可根据专业特点以及学时数情况进行调整 and 选择。

本书由武汉理工大学交通学院詹德新和王家楣共同编写,其中詹德新编写第一至第八章内容,王家楣编写全书例题、习题以及思考与讨论题,全书由詹德新主编。

本书承蒙海军工程大学郑学龄教授审阅,并提出了许多宝贵意见和建议,在此表示衷心的感谢!武汉理工大学教务处对本书的出版给予了大力支持,此外本书的绘图得到了研究生曹春燕同学、刘艾明老师以及刘晓静老师的大力帮助,在此一并致谢!

由于编者水平有限,书中的缺点和错误在所难免,恳请读者批评指正。

编 者
2001 年 8 月

目 录

绪 论	(1)
§ 0-1 流体力学研究对象	(1)
§ 0-2 流体力学发展简史	(2)
第一章 流体属性及流体静力学	(9)
§ 1-1 流体定义及连续介质假定	(9)
§ 1-2 流体密度、重度和粘性	(11)
§ 1-3 流体的其他属性	(18)
§ 1-4 作用在流体上的力	(22)
§ 1-5 流体静压特性及静止流体中压力变化规律	(24)
§ 1-6 静止流体作用在壁面上的力	(30)
例 题	(36)
思考与讨论题	(45)
习 题	(48)
第二章 流体运动学	(57)
§ 2-1 迹线、流线和色线	(57)
§ 2-2 研究流体运动的两种方法	(61)
§ 2-3 几个基本概念	(64)
§ 2-4 流体连续性方程	(67)
例 题	(72)
思考与讨论题	(76)
习 题	(78)

第三章 流体动力学	(82)
§ 3-1 流体运动微分方程	(82)
§ 3-2 伯努利方程	(86)
§ 3-3 伯努利方程的应用	(91)
§ 3-4 积分形式动量方程和动量矩方程	(98)
例 题	(105)
思考与讨论题	(114)
习 题	(117)
第四章 粘性流体一元管流	(127)
§ 4-1 粘性流体的两种流态	(127)
§ 4-2 圆管中的层流	(129)
§ 4-3 圆管中的湍流	(131)
§ 4-4 粘性流体总流的伯努利方程	(134)
§ 4-5 管流水头损失	(138)
§ 4-6 管流水力计算	(144)
§ 4-7 管流中的水击	(153)
例 题	(158)
思考与讨论题	(163)
习 题	(164)
第五章 流体孔口出流与缝隙流动	(173)
§ 5-1 流体孔口出流的分类	(173)
§ 5-2 薄壁小孔口定常自由出流	(176)
§ 5-3 厚壁孔口定常自由出流	(181)
§ 5-4 平行平板缝隙流动	(185)
§ 5-5 圆柱环形缝隙流动	(193)
§ 5-6 倾斜平板缝隙流动	(197)
§ 5-7 平行圆板缝隙径向流动	(202)

§ 5-8 液压支承基本原理	(207)
例 题	(219)
思考与讨论题	(229)
习 题	(230)
第六章 粘性流体绕物体流动	(234)
§ 6-1 边界层概念	(234)
§ 6-2 边界层微分方程	(237)
§ 6-3 平板边界层动量积分方程及近似计算	(239)
§ 6-4 边界层的流动分离	(244)
§ 6-5 绕流物体的阻力	(248)
§ 6-6 低雷诺数流动	(251)
例 题	(255)
思考与讨论题	(260)
习 题	(261)
第七章 相似理论与量纲分析	(263)
§ 7-1 相似概念	(263)
§ 7-2 流体力学中的相似准则	(265)
§ 7-3 量纲分析法	(269)
§ 7-4 相似理论的应用	(273)
例 题	(276)
思考与讨论题	(282)
习 题	(283)
第八章 可压缩气体动力学基础	(285)
§ 8-1 可压缩气流的一些基本概念	(285)
§ 8-2 音速	(288)
§ 8-3 激波	(292)
§ 8-4 一维定常气流基本方程	(296)

§ 8-5 气体在变截面喷管中的流动	(300)
§ 8-6 在等截面管中有摩擦的绝热流动	(306)
§ 8-7 缩放喷管在非设计工况下流动分析	(311)
例 题	(313)
思考与讨论题	(323)
习 题	(324)
参考书目	(326)

绪 论

§ 0-1 流体力学研究对象

凡是能够流动的物质即称为流体,它主要包括液体和气体。

流体力学是以流体为研究对象,研究流体平衡和运动规律的一门学科。具体地说,流体力学主要研究流体通过各种形状的通道和绕过各种形状的物体时流体流动的规律(如速度分布、压力分布等),以及流体与其接触的固体相互作用力。

在 20 世纪以前,流体力学作为物理学的一个分支,主要是采用数学化和理想化的研究方法,在实际中得不到广泛的应用。现代流体力学则采用理论、实验和计算相结合的方法,与工程实际问题紧密结合,使经典流体力学得到了广泛应用。如现代水利工程的建设、造船工业的发展是同水动力学的发展密切相关的;现代航空工业中各种飞机和飞行器的设计都离不开空气动力学和气体动力学的基本原理;机械工业中的润滑、冷却、液压传动、气力输送以及液压和气动控制问题的解决,都必须依靠流体力学的理论;在各种热能动力设备中,其工作介质都是流体(如水、汽、空气、烟气等),因此热能动力设备的设计都必须服从流体流动规律;在环境工程中,有关陆地、海洋污染物在空气或水中的排放及扩散则也与流体力学紧密相关;此外在土木建筑中的给水排水、采暖通风,海洋中波浪、环流、潮汐,人体内的血液流动等都涉及到众多的有关流体力学问题。

§ 0-2 流体力学发展简史

流体力学和其他学科一样,是人类为了满足自身生活和生产的需要,在认识与改造自然的过程中,随着实践经验的不断积累,技术与知识水平的逐渐提高,才开始形成和发展起来的,这一过程大致可分为五个时期:

第一时期——约公元前 30 000 世纪至前 20 世纪

从世界范围来看,这一时期主要包括旧石器时代和新石器时代(前 90 世纪至前 20 世纪)。

在旧石器时代早期,我们的祖先除了用天然石块、木棒以外,主要是打制一些简单、粗糙的石质工具,如砍砸器、刮削器、尖状器和原始石球等去采集植物果实和捕捉动物。在制作工具的过程中,已逐步知道应用力学中的尖劈原理。在投掷石块、木棒、石球和以后经过改进的各种投掷物(如短矛与箭)时,就提出了抛射体在流体中的运动问题。

进入中期以后,出现了复合工具,它们的典型代表是用石球与绳索制成的飞石索与绊兽索。这些工具不仅大大提高了狩猎的射程和杀伤力,而且还使人们意识到为了稳定飞行方向、减少阻力、扩大射程必须把石球制作得尽量接近球形。

晚期的特点是发明了磨制技术与钻孔技术,出现了细石器和骨制工具。欧洲普遍使用投矛器,它是利用增加投掷臂长以提高矛的初始速度。我国发现了 3 万年前的石镞和近 2 万年前的骨针。石镞的出现表明已有了弓箭,它是将机械功储存为势能再转换成动能以提高箭的速度,更令人吃惊的是当时人们已认识到为了保证箭的飞行稳定需要在箭的尾部安装一些羽毛一类的配重物。

英国、埃及、荷兰和中国还分别发现了公元前 7 千多年至前 5

千年的独木舟、宽翼与窄翼木桨等,这充分表明早在新石器时代初期,人们对浮力与反作用力的认识与应用就已达到相当成熟的阶段。另一推动船舶前进的工具是风帆,尼罗河上至少公元前 3000 多年就出现了帆船,中国的甲骨文中也早已有了“帆”字,这说明中国至少也有 3 千多年的用帆历史。风帆的出现是人类开始对第三种自然力——风的利用和控制。

为了生产和生活的需要,约公元前 2000 年中国就发明了计时的陶制单壶滴漏,600 年后,埃及出现了类似的计时工具,称为水钟,它们都是应用孔口出流原理制成的。

第二时期——公元前 20 世纪至 17 世纪下叶

此时,人们对流体力学知识与工程设计概念仍然非常缺乏,只能依靠观察、测量和实践——提高——再实践——再提高的过程,去认识流体运动的一般性质和应用它的定性规律。

约公元前 1000 年与公元 1 世纪中国分别发明了利用反作用原理控制船舶航向的木橹和尾舵,这是对世界造船业的一大贡献,欧洲直到 19 世纪才开始使用橹与舵。

约公元前 700 年,管仲(前 725 ~ 前 645)科学地总结了中国的治河与修渠经验,其中包括河渠与堤坝的定量设计理论,河流与河道的相互作用等。这些论述,对后来的工程实践起了很好的指导作用。

在古希腊和古罗马,公元前 5 世纪时,恩贝多克里(前 492 ~ 前 432)通过观察旋风和搅动盛于容器中的带颗粒液体发现了所谓“茶杯现象”。100 年后,亚里斯多德(前 384 ~ 前 322)探讨了运动物体的阻力问题和旋风与旋涡的成因等。再 100 年后,特斯贝斯(前 3 世纪)发明了单动式单活塞唧筒(泵)。菲罗(前 3 世纪)发明了用下击式水轮带动的链—筒式水车和虹吸管。维特鲁维斯(前 1 世纪)随即深入分析了各种下击式水车,如鼓式、链—筒式和筒—轮式等。至公元 1 世纪,希罗(62 ~)描述了一种用蒸汽转动的

圆球,它实际上是喷气原理的最早应用。

当欧洲出现水磨时,中国也将水力用于推动石碓和石磨。公元1世纪,毕岚与杜诗分别发明了用于灌溉提水的翻车(即龙骨车)和用于冶炼鼓风的水排。在风力利用方面,公元前40年,中国发明了利用人造风分离谷糠与谷籽的旋转扇车。12世纪前后又发明了双动式单活塞风箱,随即发展为各式各样的风箱。这些鼓风装置如扇车、风箱和龙骨车均于16世纪后传入欧洲。水车、水磨与风车的出现标志着人类对自然力的进一步应用与控制。

此外,中国在前4世纪就发明了比弓箭射程更远、杀伤力更强的弩。10世纪时,中国又巧妙地发明了双动式火焰喷射器,它的性能大大优于欧洲的单动式火焰喷射器。

中国的墨子(前468~前370)曾经对浮力现象做过仔细的观察和定性的概括,约2世纪后,阿基米德(前287~前212)提出浮力的定量理论。

在航空方面,鲁班(前507~前444)与墨子就分别用竹木制成了能在空中飞翔的鹊和木鸢,这是最早的风筝和飞行器。公元3世纪,葛洪(284~363)制造“飞车”(即竹蜻蜓),被世界公认为是飞机螺旋桨与直升机旋翼的始祖。公元1161年,中国将喷气推动的火箭和火箭式“霹雳炮”用于战争。这是世界航空史上最早使用火箭的纪录。

早在公元前2世纪的《黄帝内经》中就确立了人体的血液循环理论。11世纪的沈括(1030~1095)结合漏壶中的渴鸟(即虹吸管)对细小圆管中的水流问题进行了仔细的研究,写出了价值颇高的“浮漏仪”一文。

15世纪,L.达·芬奇(1452~1519)重视观察与实验方法,描绘和叙述了许多重要流动现象,正确地叙述了相对性原理和归纳了定常流动的连续性原理。1638年,伽利略(1564~1642)首先将实验方法引入力学,并用以研究运动物体的阻力。1647年,B.帕斯卡(1623~1662)通过现场测量,提出流体静力学的基本关系式。

第三时期——17 世纪下叶至 20 世纪初叶

这是流体力学的初步形成与发展时期,逐步建立与发展了解决流体力学问题的理论与实验方法,并初步加以应用。

1678 年 I. 牛顿(1642 ~ 1727)利用理论与实验相结合的方法,研究运动物体所受的阻力。同时,他通过分析实验,还首先提出粘性流体的剪应力公式,这为建立粘性流体的运动方程组创造了条件。1732 年 H. 皮托(1695 ~ 1771)发明了测量流体总压的皮托管。1905 年 L. 普朗特(1875 ~ 1953)将其发展为测量总压与静压的皮托—静压管。1738 年 D. 伯努利(1700 ~ 1782)对孔口出流与变截面管道流动进行了仔细的观察与推理和广泛的测量,提出著名的定常不可压缩流体的伯努利定理。1748 年 M. W. 罗蒙诺索夫(1711 ~ 1765)提出质量守恒定律。1752 年 J. le. R. 达朗伯(1717 ~ 1783)在研究物体阻力时,获得达朗伯佯谬。同年,他根据质量守恒原理,首次提出流体的连续性方程。

1775 年 L. 欧拉(1707 ~ 1783)提出流体运动的描述方法和无粘性流体运动的方程组,并开始研究无粘性无旋流体的平面与空间运动。欧拉是理论流体力学的奠基人。6 年后, J. L. 拉格朗日(1736 ~ 1813)引进流函数的概念,并首先获得无粘性无旋流动所应满足的动力学条件(即拉格朗日定理),和提出求解这类流动的复位势法,他进一步完善了无粘性无旋流动的基本理论。

19 世纪上、中叶开始出现对粘性流体、无粘性有旋流体与可压缩气体流动的理论研究。1823 年 L. 纳维(1785 ~ 1836)与 1845 年 G. G. 斯托克斯(1819 ~ 1903)分别用不同的假设和方法,建立了不可压缩与可压缩粘性流体的运动方程组,从此,开始了粘性流体运动的研究。在此之前,1840 年 J. L. M. 泊肃叶(1799 ~ 1869)与 1839 年 G. W. 哈根(1797 ~ 1884)分别独立地发表了他们对细小圆管中层流流动的实验结果,它与 1845 年斯托克斯获得的理论结果完全吻合。

早在 1742 年 B. 罗宾斯(1707 ~ 1751)为了研究炮弹飞行,就用圆球进行了高速(后来估算,马赫(1838 ~ 1916)数 $M = 1.04$)运动物体的阻力实验。1808 年 S. D. 泊松(1781 ~ 1840)与 1848 年斯托克斯分别对等温气体中的简单波与间断面进行了研究,后者并根据质量与动量守恒原理,建立了间断面前后流动参量所应满足的关系式。这是对可压缩气体运动的理论研究的开始。

1852 年 F. 雷什(1799 ~ 1882)通过对波浪运动的观察和船舶模型的实验,提出重力作用下流体运动的相似性参数——雷什数,即现在的佛鲁德数。

19 世纪末叶的另一进展为对湍流开始了系统研究,发展了相应的实验设备。1883 年 O. 雷诺(1842 ~ 1912)用不同直径的圆管,进行了一系列实验,结果发现流动有两种状态,即层流与湍流;而且从层流到湍流的过渡,仅依赖于一个无量纲数(现称雷诺数)。12 年后,他又引进湍流(或雷诺)应力的概念,并用时均方法,建立了不可压缩流体作湍流运动时所应满足的方程组。雷诺的研究为湍流的理论研究奠定了基础。

第四时期——20 世纪初叶至中叶

进入 20 世纪以后,流体力学的理论与实验研究除了在已经开始的各个领域继续工作以外,均围绕发展航空航天事业的需要进行。在运动物体的升力方面,1902 年 W. M. 库塔与 1906 年 N. E. 儒可夫斯基(1847 ~ 1921)分别独立地提出了特殊的与一般的库塔—儒可夫斯基定理和假定。1910 年 H. 布拉修斯与卡普雷金(1869 ~ 1942)分别独立地提出了一般二维物体受力公式,这样就建立了完整的二维升力理论。1901 年 E. J. 马雷(1830 ~ 1904)首先拍摄到清晰的尾流照片,7 年后, H. 贝纳德研究尾流涡系中各参量之间的关系。1912 年 T. von 卡门(1881 ~ 1963)从理论上分析了涡系(即卡门涡街)的稳定性。

1904 年 L. 普朗特在自建的水槽中进行了大量测量与仔细观

察之后,提出了著名的边界层理论。1921年卡门提出解边界层方程的动量积分关系式,这是一种较好的近似方法。

在1910~1945年的30年期间,机翼理论与实验有着极大的发展,1910年儒可夫斯基首先用共形映射法获得(后来以他的名字命名)一种理想的翼型,从此开始了翼型的理论研究。三年后,普朗特在实验与计算的基础上提出了第一个可供应用的三维机翼理论,即普朗特—兰彻斯特升力线理论。1925年J.阿克瑞特(1898~1981)首先提出超声速翼型的线性化理论,由此,揭开了超声速机翼理论的研究,在大力开展机翼理论研究的同时,各先进工业国家还对低速与高速翼型,机翼与组合体等进行了大量的实验研究,积累了丰富的设计参考资料。

1920年A.布泽曼改进了15年前由普朗特设计建造的、 $M=1.5$ 的第一座超声速风洞,并使其投入使用。1928年与1930年H.格劳尔与L.普朗特分别独立地提出以他们的名字命名的相似性准则,通过它,在亚声速范围内,可以修正翼型升力的压缩性影响。1939年与1941年钱学森与卡门分别独立地提出一更精确的准则。以后,这种方法经常在机翼理论中使用。1929年H.L.德莱顿(1898~1965)引进湍流强度的概念,1932年,他又用自己设计制造的热线流速计,第一次成功地测量到湍流脉动速度。

为了管路系统的设计与基础研究,在本世纪的40年代,J.尼古拉兹对各种光滑与粗糙的圆形或非圆形管道的时均速度分布和摩擦系数,进行了系统、准确、精心的测量。1954年J.劳弗与P.S.克莱巴诺夫又分别对沿圆管与沿平板的湍流特性进行了出色的测量。

第五时期——20世纪中叶以后

进入20世纪50年代后期,人类飞行与进入太空的愿望均已基本实现,流体力学的研究内容有了明显的转变,除了对一些较难、较复杂的问题,如湍流、流动稳定性与过渡、涡旋动力学和非定

常流等继续进行研究外,更主要的是转而研究石油、化工、能源、环保等领域中的流体力学问题,并与有关的邻近学科相互渗透,形成许多新分支或交叉学科,如计算流体力学、实验流体力学、可压缩气体力学、稀薄气体力学、磁流体力学、天体物理流体力学、液体动力学、地球物理流体力学、非牛顿流体力学、生物流体力学、多相流体力学、环境流体力学、物理—化学流体力学、渗流力学和流体机械流体力学等。一般说来,这些新的分支或交叉学科所研究的现象或问题都比较复杂,在流动过程中不仅有动量传递,很多时候还有热量传递和质量传递,甚至还伴随有物理或化学反应,而且所研究的流体本身也不简单地是单相的或牛顿的,很多时候是多相的或非牛顿的。面对这些众多而又复杂的新问题,要想很好地解决它们,实际上是对流体力学工作者的一次大挑战。因为现有的流体力学运动方程组并不能完全准确地描述这些新现象和新问题,试图用现有的运动方程组和纯计算的方法去解决这些问题也是相当困难的。惟一可行的道路是采用纯实验的方法或实验与计算相结合的方法。因后一种方法中,即先用实验方法获得一些有用的经验数据,然后与计算方法相结合进行半经验的数值计算,并将所得的结果与纯实验结果进行比较。近年来在一些新分支或交叉学科(如多相流、生物流体力学等)中采用这种方法,获得了比较好的效果,特别是大大推动了新分支或交叉学科实验技术的发展。

第一章 流体属性及流体静力学

§ 1-1 流体定义及连续介质假定

一、流体的定义

通常我们说能够流动的物质就称为流体。流体主要为液体和气体。从力学的特征讲,流体和固体的不同之处在于,流体是一种受任何微小剪切力都能连续变形的物质,只要这种力继续作用,流体就将继续变形(流动)(见图 1-1);只有当外力停止作用,变形才会停止。而对固体,当受到剪切力作用时,固体仅产生一定程度的变形,只要作用力保持不变,固体的变形也就不再变化(见图 1-2)。由此可见,流体与固体的不同之处在于流体具有容易变形(流动)的特点。

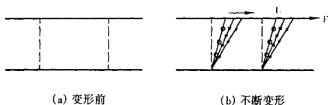


图 1-1 流体的变形

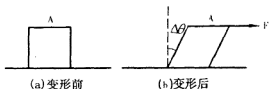


图 1-2 固体的变形

二、连续介质假定

众所周知,任何流体都是由分子组成的,分子和分子之间存在间隙。这就是说,从微观角度看,流体并不是连续分布的物质。但是,流体力学并不研究微观的分子运动,而是研究流体的宏观机械运动。在研究流体的宏观运动中,我们所取的最小流体微元是体积为无穷小的流体微团(或称流体质点)。流体微团虽小,但却包含为数甚多的分子。在工程上通常 1mm^3 是很小的体积,但在标准状态下所包含的气体分子数目有 2.7×10^{26} 个。只要我们在研究流体运动时所取的流体微团包含足够多的分子,从而使各物理量的统计平均值有意义,我们就可以不去研究无数分子的瞬时状态,而只研究流体运动的某些宏观属性(如密度、速度、压力、温度等)。这就是说,可不去考虑分子间隙,而把流体视为由无数连续分布的流体微团所组成。这就是流体的连续介质假定。

当把流体作为连续介质来处理时,那么表征流体属性的密度、速度、压力及温度等物理量一般在空间也应该是连续分布的,亦即这些物理量应该是空间坐标和时间的单值连续可微函数。这样,我们就可以利用微分方程等数学工具去研究流体平衡和运动规律了。

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正确的,但对某些特殊问题则是不适用的。例如,火箭在高空稀薄的气体中飞行,由于其气体分子的自由行程可与所涉及的最小有效尺寸相比拟,此时必须舍弃宏观的连续介质研究方法。