

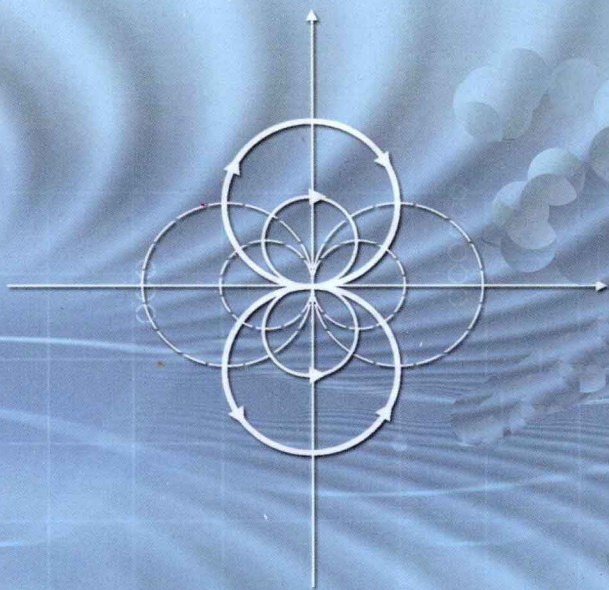
高等学校规划用书

Liuti Lixue Yu Liuti Jixie LIUTI LIXUE

流体力学与流体机械

流体力学

张景松 杨春敏 编著



中国矿业大学出版社

China University of Mining and Technology Press

高等学校规划用书

流体力学与流体机械

流体力学

张景松 杨春敏 编著

中国矿业大学出版社

内 容 提 要

本书主要介绍了流体静力学、流体运动学和流体动力学基本理论,包括管路特性、绕流阻力、明渠流计算、相似理论和空气动力学基础等。

本书可作为工科院校动力工程、机电、机械、采矿工程、通风安全和选矿工程等专业流体力学课程的教材,也可供有关工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

流体力学:流体力学与流体机械/张景松,杨春敏编著. —3
版. —徐州:中国矿业大学出版社,2010.12
ISBN 978 - 7 - 5646 - 0713 - 5

I. ①流… II. ①张…②杨… III. ①流体力学②流体机械
IV. ①O35②TH3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 136559 号

书 名 流体力学
编 著 张景松 杨春敏
责任编辑 褚建萍
责任校对 何晓慧 徐 玮
出版发行 中国矿业大学出版社有限责任公司
(江苏省徐州市解放南路 邮编 221008)
营销热线 (0516)83885307 83884995
出版服务 (0516)83885767 83884920
网 址 <http://www.cumtp.com> E-mail: cumtpvip@cumtp.com
印 刷 淮安市亨达印业有限公司
开 本 850×1168 1/32 本册印张 9.125 本册字数 237 千字
版次印次 2010 年 12 月第 3 版 2010 年 12 月第 1 次印刷
总 定 价 30.00 元(共两册)

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

第三版前言

许多生产部门都离不开诸如水泵、风机和压气机等流体机械,而这些机械的工作原理又以流体力学为基础。此外,工业通风、液压传动和煤炭分选等都需要流体力学知识。因此,流体力学是培养机电、电力、采矿工程和通风安全等专业的高级人才不可缺少的基础知识。

本书是参照上述各专业的流体力学课程教学大纲编写的。总学时为 30~48,使用中可根据专业特点和课程的学时安排适当取舍。

本书在内容选编上同时照顾各专业的需要,并特别注意不同学时要求时内容的前后衔接。编写中除加强基本理论外,还力求贯彻理论联系实际的原则。为巩固所学内容,培养分析和计算能力,特在每章结束处选编相当数量的思考题和习题。

由于作者水平有限,书中缺点和错误之处在所难免,恳请读者批评指正。

作 者

2010 年 6 月

目 录

绪 论	1
第一章 流体及其物理性质	6
第一节 流体的概念	6
第二节 流体的密度和重度	8
第三节 流体的压缩性与膨胀性	9
第四节 流体的黏性	12
本章小结	19
思考题及习题	20
第二章 流体静力学	22
第一节 作用于流体上的力	22
第二节 流体的静压力及其特性	23
第三节 流体的平衡微分方程式	26
第四节 重力场中流体静力学基本方程	29
第五节 压力的单位和压力的测量方法	33
第六节 液体的相对平衡	39
第七节 静止液体对壁面的作用力	46
本章小结	55
思考题及习题	56
第三章 流体运动学	63
第一节 研究流体运动的两种方法	63
第二节 基本概念	66
第三节 连续性方程	72

第四节	流体微团的运动分析	76
第五节	势函数和流函数	80
第六节	平面势流及其叠加	84
本章小结	.....	93
思考题及习题	.....	96
第四章	流体动力学基础	98
第一节	理想流体的运动方程式	98
第二节	黏性流体的运动方程式	100
第三节	理想流体的伯诺里方程	104
第四节	伯诺里方程的能量意义和几何意义	106
第五节	相对运动的伯诺里方程	107
第六节	总流伯诺里方程	109
第七节	伯诺里方程的应用	115
第八节	动量方程	125
第九节	动量矩方程	131
本章小结	.....	135
思考题及习题	.....	137
第五章	黏性流体流动及阻力	145
第一节	流动阻力的分类	145
第二节	黏性流体的两种流动状态	146
第三节	附面层和管流起始段的概念	151
第四节	圆管中的层流流动	154
第五节	缝隙流	158
第六节	圆管中的紊流流动	164
第七节	不可压缩流体绕物体的流动	169
本章小结	.....	180
思考题及习题	.....	181

第六章 能量损失及管路计算	186
第一节 沿程阻力系数.....	186
第二节 局部阻力系数.....	192
第三节 管路计算.....	202
第四节 有压管路中的水击.....	210
第五节 明渠均匀流.....	215
本章小结.....	227
思考题及习题.....	229
第七章 相似原理和量纲分析	234
第一节 相似原理.....	234
第二节 量纲分析—— π 定理.....	244
本章小结.....	251
思考题及习题.....	251
第八章 气体动力学基础	254
第一节 音速及压力扰动的传播.....	254
第二节 理想气体的一元等熵流.....	263
第三节 收缩喷管和缩放喷管.....	269
第四节 等断面管中的有摩擦绝热流动.....	275
本章小结.....	277
思考题及习题.....	278
参考文献	281

绪 论

一、流体力学的研究对象

流体力学是以流体(包括液体和气体)为对象,研究其平衡和运动基本规律的科学。主要研究流体在平衡和运动时的压力分布、速度分布、与固体之间的相互作用以及流动过程中的能量损失等。流体力学中研究最多的流体是水和空气。它的主要基础是牛顿运动定律和质量守恒定律,常常还要用到热力学知识和物理学基础知识。

流体力学在许多工程技术领域和国民经济各生产部门有着广泛的应用。矿井生产中的通风、排水、压气以及煤和其他矿物的分选都离不开流体力学,机械工业中的润滑、冷却、液压传动及控制等都必须依靠流体力学基本理论。此外,水利工程、采暖通风、石油化工、航空航天等都会广泛地用到流体力学知识。而且,随着科学技术的飞速发展,许多现代科学技术所关注的问题都不可避免地要用到流体力学的知识。因此,流体力学是一门重要的技术基础课程。

二、流体力学的发展概况

同其他自然科学一样,流体力学也是人类在不断遭遇自然力威胁并在与之抗衡的过程中逐渐形成和发展起来的。

人类对流体的认识最早是从水开始的。远古时代,为了减少洪水和干旱对人类生命和生活的威胁,先祖们在水利工程方面做了很多工作,如埃及、罗马和希腊等地的水利工程;公元前 256 年的都江堰灌渠工程和隋朝时开凿的闻名中外的京杭大运河等都是很好的例证。可以说,流体力学的形成和发展是从水力学开始的。古希腊哲学家阿基米德(公元前 287~前 212)是最早从事水力学研究的学

者,他建立了包括物理浮力定律和浮体稳定性在内的液体平衡理论,奠定了流体静力学的重要基础,流体力学的万丈高楼才得以在其基础上建立起来,他的《论浮体》一书也是最早的水力学著作,其中论述了著名的浮力定律。正是从此时起,流体力学才开始成为一门独立的学科。但令人扼腕的是,此后千余年间,流体力学没有重大发展和突破。直到15世纪,意大利科学家和艺术家达·芬奇在其著作中才谈到水波、管流、水力机械、鸟的飞翔原理等问题。

16世纪到19世纪初,由于资本主义的兴起和发展,特别是欧洲的产业革命,使流体力学开始得到了迅速发展。这一时期,许多学者对流体力学的基础理论做出了显著的贡献。如帕斯卡(1623~1662)证明了平衡流体中压力传递规律,牛顿(1643~1727)建立了流体内摩擦定律,欧拉(1707~1783)采用了连续介质的概念,把静力学中压力的概念推广到运动流体中,导出了描述理想流体运动的微分方程。19世纪初,纳维尔和斯托克斯推导了描述黏性流体运动的微分方程。这些理论成就无疑为流体力学的进一步发展奠定了基础。但由于忽略了一些次要因素而将流体理想化,使得某些理论与实际情况差距很大,这促使一些学者加强了对流体的实验研究。伯努利(1700~1782)就是他们的典型代表。他通过大量实验,总结和导出了流体流动过程中的能量转换基本关系,即伯努利方程。这一时期,根据对理论分析和实验研究的侧重不同,形成了流体力学的两个发展方向:一个是以数学为工具的理论流体力学;另一个是以实验为手段的实用水力学。由于这两种研究领域未进行交流,使得实用水力学因忽视理论而无法归纳与分析大量的实验数据,理论流体力学又因不重视实际而不能解释实际中的各种复杂现象。

从19世纪末到20世纪初,工业生产的突飞猛进大大加速了流体力学的发展,而且研究的重点也不再局限于水,逐渐扩展到如油、空气等领域。这时,各种各样的流动现象需要理论来解释,而大量的实验数据又急需归纳分析,整理成经验公式,这又促使了理

论研究和实验研究的结合。促成这一事实的因素是以研究物理现象相似规律为对象的相似理论和量纲分析的建立和发展。这一阶段的主要成就有：雷诺对流动状态的实验研究，指出了流体的流动客观上存在层流和紊流两种状态，并根据实验结果归纳了判别流动状态的准则——雷诺数。雷诺的相似理论和瑞莱夫的量纲分析不仅解决了大量实际问题，也为理论分析和实验研究建立了沟通渠道。另外，普朗特、尼古拉茨、儒可夫斯基等众多学者也为流体力学的不断完善做出了卓越的贡献。

20 世纪 60 年代以后，随着科学技术的不断进步，各工业部门的技术问题也更趋专业化，致使许多独立的学科不断从流体力学中分离出来。例如从 20 世纪 50 年代起，电子计算机的不断完善，使原来用理论分析方法难以进行研究的课题，可以用数值计算方法来进行，出现了计算流体力学这一新的分支学科。目前已形成的有：空气动力学，流变学，电磁流体力学，两相流体力学，高、超音速空气动力学和计算流体力学等。

三、流体力学的研究方法

流体力学的研究方法主要可以分为实验研究、理论分析和数值计算三种。

实验研究是古老而有效的研究方法，航空、航天和水利枢纽等复杂系统最初都是依赖实验才得以顺利实现的。这种方法的优点是：能直接解决生产中的复杂问题，能发现流动中的新现象，它的结果可以作为检验其他方法是否正确的依据。其不足之处在于：对不同情况，需做不同实验，即所得结果的普适性较差，且有些实验的费用较高。

理论分析是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。这种方法的优点是：分析解可以明确给出各种物理量与流动参数之间的变化关系，有较好的普遍适用性。

其不足之处在于:数学上的困难较大,能获得的分析解数量有限。

数值计算则是利用电子计算机求解复杂的流体力学基本方程组,它可部分或全部代替某些实验。随着数学的发展、计算机性能的不断f提升以及流体力学各种计算方法的发明,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,这又促进了流体力学计算方法的发展,并形成了计算流体力学。这种方法的优点是:许多用理论分析法无法求解,或实验无法实现的问题,用此法可以求得数值解,在一定程度上可以节约实验费用。其不足之处在于:对于缺乏完善数学模型及必要计算条件的问题,仍无能为力。

在解决流体力学问题时,实验研究、理论分析和数值计算几方面是相辅相成的。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实验数据,以建立流体运动的数学模型。最后,还须依靠实验来检验这些模型的完善程度。

四、单位制

本书所涉及的物理量将全部采用国际单位制(即SI制)。SI单位制中,我们将要涉及的四个基本单位是:质量、长度、时间和热力学温度(简称温度)。其他物理量,如力、压力、速度等的单位均属导出单位。今后的计算中往往会遇到单位的换算。为避免混淆,将有关物理量的单位及换算关系列于表0-1中。

表0-1 国际单位与工程单位的换算关系

物 理 量		国际单位		换 算 关 系
名称	符号	名称	符号	
长度	l	米	m	$1 \text{ kg} = 0.102 \text{ kgf} \cdot \text{s}^2 / \text{m}$
质量	m	千克	kg	
时间	t	秒	s	

绪 论

续表 0-1

物 理 量		国际单位		换 算 关 系
名称	符号	名称	符号	
热力学温度	T	开	K	$1\text{ K}=273.15+t/^{\circ}\text{C}$
力	F	牛[顿]	N	$1\text{ N}=1\text{ kg}\cdot\text{m}/\text{s}^2=0.102\text{ kgf}$
密度	ρ	千克/米 ³	kg/m ³	$1\text{ kg}/\text{m}^3=0.102\text{ kgf}\cdot\text{s}^2/\text{m}^4$
重度	γ	牛顿/米 ³	N/m ³	$1\text{ N}/\text{m}^3=0.102\text{ kgf}/\text{m}^3$
功,能	W	焦[耳]	J	$1\text{ J}=1\text{ N}\cdot\text{m}=2.388\times 10^{-4}\text{ 千卡(kcal)}$
功率	N	瓦[特]	W	$1\text{ W}=1\text{ J}/\text{s}=0.102\text{ kgf}\cdot\text{m}/\text{s}$
压 力	p	帕	Pa	$1\text{ Pa}=1\text{ N}/\text{m}^2=1.02\times 10^{-5}\text{ kgf}/\text{cm}^2$
				$1\text{ 工程大气压}=1\text{ kgf}/\text{cm}^2=98\ 060\text{ Pa}$
				$1\text{ 标准大气压(atm)}=101\ 325\text{ Pa}$
				$1\text{ 巴(bar)}=10^5\text{ Pa}$
[动力]黏度	μ	帕·秒	Pa·s	$1\text{ Pa}\cdot\text{s}=1\text{ N}\cdot\text{s}/\text{m}^2=10\text{ 泊(P)}$
运动黏度	ν	米 ² /秒	m ² /s	$1\text{ m}^2/\text{s}=10^4\text{ 斯托克斯(St)}$

第一章 流体及其物理性质

在研究流体运动之前,必须先了解流体的物理性质及其影响因素。本章首先介绍流体的特征和对微观流体的处理方法——连续介质假说,在此基础上介绍表征流体惯性的密度和重度,论述反映流体密度变化程度的压缩性和膨胀性,最后介绍影响流体流动及阻力特性的黏性。

第一节 流体的概念

一、流体的特征

流体与固体一样是由分子组成的。我们知道,固体能够以它的剪切变形来承受一定的剪切力,使之处于平衡状态。流体则不同,任何微小的剪切力都会使它发生连续的剪切变形——流动。因此可以说,能够流动的物质称为流体。或者更准确地说,在任何微小的剪切力下能产生连续变形的物质即为流体。流动性是流体的主要特征。此外,流体与固体的区别还在于固体在静力平衡时具有一定的形状;而流体的形状则取决于盛装它的容器。

流体可分为液体和气体。因它们分子之间的距离差别很大,性质也各不相同。

在一定压力和温度下,液体具有一定的体积,与盛装它的容器大小无关,可以有自由面。 1 cm^3 的水中约有 3.4×10^{22} 个分子,分子间的距离约等于分子的平均直径。相对固体而言,液体分子

的结构要复杂得多。分子没有固定的位置,可以随时互相替换。每个分子都处在相邻分子的强凝聚力场中,因而又不能像气体分子那样可以自由运动。

在任何情况下,气体总要膨胀充满其所占据的空间。所以,气体的体积是随它所占空间的体积变化的,因而气体分子之间的平均距离也是变化的,在标准状态下,1 cm³ 的空气中约有 2.7×10^{19} 个分子,平均距离约为分子平均直径的 10 倍。气体之所以能膨胀,是因为气体分子之间的相互作用力极其微弱,因此可以自由运动,与其他分子或器壁相撞之后只是运动方向发生改变而已。这种随机碰撞的宏观表现即为气体的压力。

二、连续介质假说

因构成流体的分子之间存在间隙,而且分子也在不停地运动,如果从微观角度来看待流体,不仅它是不连续的,而且流体的运动也是随机的,这必将给研究带来极大的困难。但是,流体力学所研究的并非是某个流体分子的微观运动,而是大量分子运动的宏观表现(即流体的宏观机械运动),而且分子的间隙相对于流动空间完全可以忽略(例如水分子的平均间隙仅为 5×10^{-8} mm 左右)。因此,从宏观上完全可以把流体看成是由无限多质点组成的连续介质,就是说,质点(而不是分子)是组成宏观流体的最小基元,质点与质点之间没有间隙,这就是连续介质假说。而所谓的质点指的是微观上充分大、宏观上充分小的分子团。一方面,分子团的尺度和分子运动的尺度相比应足够大,使得分子团中包含大量的分子,对分子团进行统计平均后能得到确定的值。另一方面又要求分子团的尺度和所研究问题的特征尺度相比要充分小,使得一个分子团的平均物理量可进行宏观测定,因而可以把分子团近似地看成是几何上的一个点。

连续介质的概念是由瑞士学者欧拉在 1753 年首先提出的,它作为一种假说在流体力学的发展史上起了巨大作用。如果流

体可视为连续介质,那么其宏观物理量(如压力、温度、密度等)在流动空间(即流场)中连续分布,而且可以对它们进行观测。实验表明,当研究流体的宏观机械运动时,连续介质假说是正确的。

将微观不连续的流体当做宏观的连续介质处理后,其物理量在流场中就是连续分布的。这样,不仅理论分析中可以运用数学这一强有力的工具,也为实验研究提供了可能。这就是连续介质假说的目的。

连续介质假说毕竟只是为研究方便而人为提出的宏观流体模型,当分析流体黏性的产生原因时,还必须考虑流体的微观结构和分子的微观运动。另外,当研究稀薄空气流动和冲波结构时,这一假说也不再适用,取而代之的是统计力学和运动理论。

第二节 流体的密度和重度

一、流体的密度

单位体积的流体所包含的质量称为密度,用 ρ 表示。若流体是均匀的,则流体中任意点的密度为

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (\text{kg/m}^3) \quad (1-1)$$

式中 m ——流体的质量,kg;

V ——流体的体积, m^3 。

若流体是非均匀的,在流体中任意点取一包围该点的流体微团,其质量为 Δm ,体积为 ΔV ,则该点的密度为

$$\rho = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta m}{\Delta V} = \frac{dm}{dV} \quad (1-2)$$

与质量一样,密度表示了流体的惯性特征,只与流体的种类有关,不随地点变化。几种常见流体的密度见表 1-1。

表 1-1 标准大气压和 20 °C 时流体的密度和[动力]黏度

液 体			气 体		
名称	密度 ρ /kg·m ⁻³	[动力]黏度 $\mu \times 10^5$ /Pa·s	名称	密度 ρ /kg·m ⁻³	[动力]黏度 $\mu \times 10^5$ /Pa·s
水	998	101	空 气	1.205	1.81
原油	856	720	水 蒸 气	0.747	1.01
汽油	678	29	氢 气	0.084	0.90
甘油	1 258	149 000	氧 气	1.330	2.00
水银	13 550	156	一氧化碳	1.160	1.82
酒精	789	116	二氧化碳	1.840	1.48
煤油	808	192	甲 烷	0.668	1.34

二、流体的重度

单位体积流体所受的重力称为重度,用 γ 表示,即

$$\gamma = \frac{G}{V} \quad (\text{N/m}^3) \quad (1-3)$$

式中 G ——流体所受的重力(即流体的重量),N;

V ——流体的体积,m³。

因 $G=mg$,由式(1-1)和式(1-3)得

$$\gamma = \rho g \quad (1-4)$$

式中 g ——重力加速度,m/s²,常取 $g=9.806 \text{ m/s}^2$ 。

第三节 流体的压缩性与膨胀性

一、流体的压缩性

流体受压体积减小的性质称为压缩性。压缩性的大小用压缩系数来度量。

温度不变时,单位压力的变化所引起的体积的相对变化量称为压缩系数,用 β_p 表示,即

$$\beta_p = -\frac{dV/V}{dp} = -\frac{1}{V} \frac{dV}{dp} \quad (\text{m}^2/\text{N}) \quad (1-5)$$

式中, dV 是因压力变化 dp 时所引起的体积变化量, V 是流体被压缩前的体积。负号则表示体积与压力的变化方向相反,即压力增大($dp > 0$)时,体积减小($dV < 0$),以使得 β_p 总为正。

若体积为 V 的流体具有的质量为 m 。因 $m = \rho V = \text{常数}$,两边微分后得 $d\rho/\rho = -dV/V$,代入式(1-5)得 β_p 的另一表达式为

$$\beta_p = -\frac{1}{V} \frac{dV}{dp} = \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dp} \quad (1-6)$$

压缩系数的倒数称为弹性模量(或弹性系数),用 E 表示,即

$$E = \frac{1}{\beta_p} = \rho \frac{dp}{d\rho} \quad (\text{Pa}) \quad (1-7)$$

弹性模量表示了流体反抗产生压缩变形的能力。 E 值越大说明流体越难压缩。20 °C 时水的弹性模量列于表 1-2。由表中看出,水的 E 值很大,即它的压缩系数很小。其他液体也是如此。所以,除某些特殊流动问题(如水击)外,工程实际中常将液体看做是密度等于常数的不可压缩流体。

表 1-2 20 °C 时水的弹性模量

压力 $p \times 10^5 / \text{Pa}$	4.90	9.81	19.61	39.23	78.45
弹性模量 $E \times 10^9 / \text{Pa}$	1.86	1.86	1.88	1.88	1.94

二、流体的膨胀性

流体受热体积增加的性质称为膨胀性。膨胀性的大小用膨胀系数来度量。

压力不变时,单位温度的变化所引起的体积的相对变化量称为膨胀系数,用 β_t 表示,即