



“十二五”江苏省高等学校重点教材

船舶流体力学



CHUANBO
LIUTI LIXUE

朱仁庆 杨松林 王志东 编著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

“十二五”江苏省高等学校重点教材(编号:2014-2-026)

船舶流体力学

朱仁庆 杨松林 王志东 编著

国防工业出版社

·北京·

内 容 简 介

全书系统地介绍了船舶与海洋工程专业所需的流体力学知识。内容包括:绪论,讲述流体力学的研究对象、发展简史、研究内容、研究方法以及流体的主要物理性质;流体静力学,讲述静止流体的平衡方程、静止流体对物体表面的作用力及力矩、流体的相对平衡;流体运动学,讲述流体运动的主要描述方法、迹线与流线、连续方程、流函数和势函数;理想流体动力学,讲述理想流体的运动方程、伯努利积分和拉格朗日积分、动量定理和动量矩定理;流体涡旋运动基本理论,讲述速度环量定理、涡旋运动基本定理、涡旋诱导的速度场;势流理论,讲述复势和复速度、典型平面流动的复势、平面势流的保角变换法、镜像定理、平面定常绕流物体受力计算、附加质量概念和计算;水波理论,讲述水波问题的基本方程和定解条件、平面驻波和进行波、波群与波速度、船行波、波能与波阻;粘性流体动力学,讲述粘性流体应力形式的运动微分方程、纳维尔—斯托克斯方程、不可压缩粘性流动的准确解、湍流理论、管道计算;相似理论与量纲分析,讲述流动相似准则、量纲分析方法及其应用;边界层理论,讲述边界层概念及基本方程、边界层动量积分方程、平板层流与湍流边界层求解、边界层分离、流动阻力及其减小方法。

本书可作为船舶与海洋工程及其相近工科专业本科生的流体力学课程教材,也可作为从事上述专业教学和研究人员的参考书。



船舶流体力学/朱仁文,杨松林,王志东编著. —北京:
国防工业出版社, 2015. 7

“十二五”江苏省高等学校重点教材

ISBN 978-7-118-10383-0

I. ①船… II. ①朱… ②杨… ③王… III. ①船舶—
流体力学—高等学校—教材 IV. ①U661.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 180771 号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

天利华印刷装订有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 21 字数 480 千字

· 2015 年 7 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 39.50 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店: (010) 88540777

发行邮购: (010) 88540776

发行传真: (010) 88540755

发行业务: (010) 88540717

前 言

流体力学是船舶与海洋工程专业的一门核心专业基础课,是船舶与海洋结构物流体性能、载荷与响应研究和分析的理论基础。随着船舶与海洋工程的快速发展,船舶流体力学领域所涉及到的难点问题和热点问题不断涌现,成为开展前沿理论、技术创新研究最为活跃的一个领域。这也为船舶与海洋工程专业流体力学工程应用及创新能力培养提出了更高的要求。

本书是在综合分析国内有关高校船舶与海洋工程本科专业所用流体力学教材内容、特点及存在问题的基础上,依据目前该专业培养和课程教学大纲要求,吸收其他专业流体力学教材的成果,结合教学团队 20 多年的教学体会和教学成果而编写成的。其主要特点为:①知识体系与基础课程和专业课程密切衔接。根据教学大纲和人才培养目标的要求,与先修的《高等数学》、《理论力学》、《材料力学》及后修的《船舶原理》课程在教学内容上做到相互衔接;②课程内容与船舶流体力学实际应用紧密结合。在内容组织上既保留经典的流体力学理论,更突出流体力学理论在船舶与海洋工程中的应用,例题、习题尽可能取之于船舶与海洋工程中的实际问题;③知识体系既注重船舶与海洋工程专业所需理论知识的独特性,又兼顾其他专业的使用,具有通用性;④给出了较为详尽的理论公式推导,以便读者能够自学、理解和掌握有关公式的导出;⑤自学课程内容充分体现本课程建设的成果。在介绍有关概念、推导有关公式、例题求解中,尽可能将教学团队近 30 年的教学体会、教学成果反映其中,以便学生更易理解概念、掌握习题求解技巧。

全书共分十章,朱仁庆负责第 1~6 章的编写及全书统稿;杨松林负责第 7 章和第 10 章编写;王志东负责第 8 章和第 9 章的编写。另外倪永燕、刘永涛、徐刚等老师及吴梓鑫等研究生也提供了一定帮助,最后江苏科技大学教务处组织同行专家对书稿进行了审定,专家们提出了许多有益的修改建议,作者在此一并表示衷心感谢!

本书编写过程中,吸纳了同类教材有关成果,特在此向有关作者和出版社致谢!

本书出版得到了江苏省高校重点教材建设项目、江苏省高校优势学科建设工程项目、江苏省高校品牌专业建设工程项目的资助。

由于作者水平有限,不妥与错误之处在所难免,恳请广大读者给予批评指正。

编 者
2015 年 4 月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 流体力学研究对象	1
1.2 流体力学发展简史	2
1.3 流体的连续介质假设	3
1.4 流体的主要物理性质	4
1.4.1 流体的流动性	4
1.4.2 流体密度、比重与比容	4
1.4.3 流体的粘性和牛顿内摩擦定律	5
1.4.4 流体的压缩性和膨胀性	9
1.5 作用在流体上的力	12
1.5.1 质量力(体积力)	12
1.5.2 表面力	12
1.5.3 理想流体中一点处的应力	13
习题	15
第 2 章 流体静力学	16
2.1 流体静力学基本方程及其应用	16
2.1.1 静止流体的平衡微分方程	16
2.1.2 重力场中不可压静止流体的压力分布	19
2.1.3 静力学基本方程的应用——测压计	23
2.1.4 非惯性坐标系中静止流体的压强分布*	27
2.2 静止流体对物体表面的作用力及力矩	31
2.2.1 静止流体对平板的作用力	31
2.2.2 静止流体对柱面的作用力	35
2.2.3 静止流体对任意曲面的作用力	38
2.3 浮力及其浮体的稳定性	39
2.3.1 浮力——阿基米德定律	39
2.3.2 潜体及浮体的稳定性*	42
习题	43
第 3 章 流体运动学	47
3.1 流动图形观察	47

3.2	描述流体运动的两种方法	49
3.2.1	流体质点和空间点	50
3.2.2	拉格朗日法(质点法)	50
3.2.3	欧拉法(空间点法)	52
3.2.4	拉格朗日法和欧拉法之间的转换*	54
3.3	迹线与流线	57
3.3.1	迹线	57
3.3.2	流线	58
3.3.3	流面、流管、流束、过流断面、元流、总流	59
3.3.4	流量与断面平均速度	60
3.4	流动的分类	61
3.4.1	定常流动和非定常流动	61
3.4.2	均匀流动与非均匀流动	62
3.4.3	缓变流与急变流	62
3.4.4	有压流、无压流与射流	63
3.4.5	空间流动(三维流动)、平面流动和轴对称流动(二维流动)	63
3.5	连续方程	65
3.5.1	系统与控制体	65
3.5.2	输运公式(流体系统内物理量对时间随体导数公式)	66
3.5.3	连续方程	68
3.6	流函数及其性质	72
3.6.1	流函数的定义	72
3.6.2	流函数与速度的关系	73
3.6.3	流函数与流线、流量的关系	73
3.7	流体微团的运动分析	75
3.7.1	亥姆霍兹速度分解定理	75
3.7.2	流体微团的运动分析	78
3.7.3	流体有旋运动与无旋运动	82
3.8	无旋运动的势函数	85
3.8.1	速度势的定义	86
3.8.2	速度势与速度投影的关系	87
3.8.3	速度势与流线、流函数的关系	87
3.8.4	速度势 φ 和流函数 ψ 求解	88
3.8.5	不可压缩流体平面势流	89
	习题	93
第4章	理想流体动力学	94
4.1	理想流体运动方程——欧拉运动微分方程	94
4.1.1	欧拉运动微分方程的导出	94

4.1.2	欧拉运动方程的各种形式	96
4.1.3	理想流体运动微分方程组的封闭性	97
4.2	伯努利积分(定常运动、沿流线或涡线的积分)	98
4.3	拉格朗日积分(无旋流场的伯努利积分)	100
4.4	两种积分的意义及其应用	101
4.4.1	积分的意义	101
4.4.2	测速计——伯努利积分的应用	103
4.4.3	拉格朗日积分的应用*	108
4.5	动量定理、动量矩定理及其应用	110
4.5.1	动量定理及动量矩定理	111
4.5.2	动量定理及动量矩定理的应用	113
	习题	123
第5章	流体涡旋运动基本理论	127
5.1	涡线、涡面、涡管、涡通量和涡管强度	127
5.2	速度环量定理(斯托克斯定理)	128
5.2.1	速度环量	128
5.2.2	速度环量定理	128
5.2.3	复连域斯托克斯定理	130
5.3	涡旋运动基本定理	133
5.3.1	开尔文定理(汤姆逊定理)	133
5.3.2	拉格朗日涡保持性定理(涡量不生不灭定理)	134
5.3.3	亥姆霍兹三定理	135
5.4	理想流体的涡量输运方程*	138
5.5	涡旋诱导的速度场(毕奥-萨伐尔定理)	139
5.5.1	直线涡束诱导的速度场	140
5.5.2	涡群的运动*	141
	习题	144
第6章	势流理论	145
6.1	不可压缩势流问题的基本方程和边界条件	145
6.1.1	不可压缩势流问题的基本方程	145
6.1.2	势流问题的边界条件	145
6.1.3	势流问题的初始条件	146
6.1.4	势流问题的求解方法	147
6.2	复势和复速度	147
6.2.1	复势和复速度	147
6.2.2	复势的可叠加性	149
6.3	平面基本流动的复势	149

6.3.1	均匀直线流	149
6.3.2	平面点源和点汇	149
6.3.3	平面点涡	150
6.3.4	平面偶极	150
6.4	平面势流基本解的叠加	151
6.4.1	均匀流和点源的叠加	151
6.4.2	均匀流和一对等强度源、汇的叠加	153
6.4.3	均匀流和偶极的叠加	154
6.4.4	绕圆柱体无环量流动	155
6.4.5	绕圆柱体有环量流动	160
6.5	平面势流的保角变换法	164
6.5.1	保角变换的概念和对应的流动关系	164
6.5.2	几种常用的保角变换关系	166
6.5.3	绕平板无环流流动	169
6.5.4	绕平板有环流流动	172
6.6	镜像定理*	174
6.6.1	平面定理	174
6.6.2	圆周定理	177
6.7	平面定常绕流物体的受力计算	178
6.7.1	作用力和作用力矩的卜拉修斯公式	178
6.7.2	库塔-儒可夫斯基定理	180
6.8	非定常无旋绕流问题*	180
6.8.1	相对运动速度势和绝对运动速度势	180
6.8.2	非定常运动速度势的求解	181
6.8.3	附加惯性力和附加质量	183
	习题	187
第7章	水波理论	189
7.1	水波概念	189
7.2	水波问题的基本方程和定解条件	190
7.2.1	基本方程	190
7.2.2	边界条件	192
7.2.3	初始条件	194
7.3	水波问题的线性化	194
7.4	平面驻波	196
7.4.1	平面驻波的解	196
7.4.2	平面驻波的特征	198
7.5	平面行进波	202
7.5.1	平面行进波的解	202

7.5.2 平面进行波的特征	204
7.6 浅水波	208
7.7 波群与群速度	212
7.8 船行波及开尔文波系*	214
7.8.1 船行波	214
7.8.2 船行波的形成	215
7.8.3 开尔文波系及船行波的波形	216
7.9 波能的转移及兴波阻力	218
7.9.1 波浪能量	218
7.9.2 能量的转移	219
7.9.3 兴波阻力	221
习题	221
第8章 粘性流体动力学	223
8.1 应力及广义牛顿内摩擦定律	223
8.1.1 粘性流场中任意一点处的应力状态	223
8.1.2 广义牛顿内摩擦定律——本构方程	228
8.2 纳维尔-斯托克斯方程	233
8.2.1 应力形式的运动微分方程	233
8.2.2 N-S 方程	235
8.2.3 粘性流体运动的基本特征	237
8.3 不可压缩粘性流动的精确解	238
8.3.1 平行平板间的定常层流运动	238
8.3.2 圆管内的定常层流运动	240
8.3.3 往复振荡平板引起的层流运动*	244
8.4 湍流及其运动特征	246
8.5 雷诺湍流方程	249
8.6 普朗特混合长度理论	252
8.7 圆管内的湍流	254
8.7.1 引言	254
8.7.2 圆管内的湍流速度分布	257
8.7.3 圆管内的摩擦阻力系数	260
8.8 管道流动局部损失	263
8.9 管路计算	267
习题	271
第9章 相似理论与量纲分析	273
9.1 流动相似及相似准则数	273
9.1.1 流动相似	273

9.1.2	相似准则数	276
9.2	量纲分析法	279
9.2.1	量纲、基本量纲、导出量纲及基本物理量	279
9.2.2	流体力学中常用物理量的量纲及量纲方程式	280
9.2.3	量纲一致性原则	281
9.2.4	π 定理	281
9.3	相似理论的应用	283
	习题	285
第 10 章	边界层理论	286
10.1	边界层概念	287
10.2	边界层的流动状态	289
10.3	边界层基本微分方程	290
10.3.1	层流边界层微分方程	290
10.3.2	边界层近似的推广	294
10.4	边界层动量积分方程	296
10.5	平板层流边界层	300
10.6	平板湍流边界层	301
10.7	平板混合边界层	305
10.8	曲面边界层	308
10.9	边界层分离及引起的阻力	310
10.10	卡门涡街*	314
10.11	圆柱与圆球绕流阻力	316
10.12	流动阻力及其减小办法	320
	习题	322
参考文献	324

第 1 章 绪 论

1.1 流体力学研究对象

流体力学是研究流体的运动规律及其应用的一门学科,它的主要任务是研究流体所遵循的宏观运动规律以及流体和周围物体间的相互作用。

流体力学具有四大支柱:一是连续介质假设,基于此假设,流场的宏观物理量可用空间点及时间的连续函数表达;二是物理学的基本定律,流体力学的基本方程组可通过数学方法按照有关物理学定律导出;三是场论,场论是研究流体运动的基础,在流体力学中有广泛的运用;四是边界层理论,它将流体与固体的相互作用有机统一。

1. 研究对象

流体力学的研究对象为流体,按其存在的状态又可分为液体和气体。

2. 流体与固体特性异同

固体具有一定形状,不易变形,既能承受法向应力,也能承受切向力,其变形可以通过应力与应变的关系来描述;流体无固定的形状,且易于变形,只能承受压力,一旦受到剪切力,便连续不断地变形,产生流动,它只能通过应力与速度变化率来描述。

3. 液体与气体特性异同

液体与气体各有特性,但又有共性。液体呈现一定容积,压缩性小,通常存在自由液面;气体无固定容积,易压缩、膨胀,高速运动下还会产生激波。若不考虑压缩性的影响和自由表面的影响,则两者遵循同一运动规律,如空中的低速飞行器和水下航行器,低速飞机的机翼和深潜水翼等,它们的受力特性是一样的。

4. 流体力学的分类

根据研究对象不同,流体力学可分为水动力学和空气动力学。其中,水动力学主要以液体为研究对象,而空气动力学主要以气体为研究对象。由于以上所提及的液体和气体既具共性,又各具特性,因此水动力学和空气动力学这两门学科既有相同的基本理论,又各具不同的特殊问题,如水动力学专门讨论水波问题,而空气动力学需特别讨论激波问题。

船舶流体力学主要研究水动力学所涉及的问题及其在船舶与海洋工程专业中的应用。从理论体系方面讲,船舶流体力学主要讲述理想流体动力学、势流理论、水波理论、粘性流体动力学、相似性理论、边界层理论等;从内容体系来讲,主要分为静力学、运动学、动力学(理想流、粘性流);从力学角度讲,其主要研究流场中速度和压力的分布及其变化规律、物体与流体的相互作用、流体对物体的作用力(矩)和产生的原因及影响因素。

5. 研究方法

流体力学的研究方法通常归结为实验、理论分析和数值计算三种。其中,实验方法最

先得到应用,其优点是:能直接解决工程实际中的复杂问题,能发现流动中新的流动现象,经分析获得新原理,实验结果可以用于验证理论分析和数值计算方法是否正确。其缺点是:对于不同的工况,需做不同的实验,所得到的结果普适性较差。理论分析方法继实验方法之后建立,其优点是:获得的解析解能明确给出各种物理量与流动参数之间的变化关系,有较好的普适性。它的缺点是:一般需要对流动问题作较大简化后才能获得解析解,许多问题无法采用;数值方法是依靠电子计算机,结合有限差分、有限元、边界元或有限体积等概念,通过数值计算和图像显示,达到对流体运动特性研究的目的。数值方法随着计算机技术的不断突破而日新月异,其优点是:许多理论分析无法求解的问题,可以通过此方法获得它们的数值解,但结果需要通过实验等方法的结果验证。缺点是:对复杂而尚未建立完善数学模型的流动问题,仍无能为力。

1.2 流体力学发展简史

流体力学是在人类不断发现自然、认识自然、适应自然的过程中和在生产实践中逐步发展起来的。

中国秦朝李冰父子带领劳动人民修建的都江堰,至今还在发挥着作用;大约与此同时,古罗马人建成了大规模的供水管道系统,等等,这些都是流体力学成功应用的范例。

古希腊的阿基米德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基础。此后千余年间,流体力学没有重大发展。直到15世纪,意大利达·芬奇的著作才谈到水波、管流、水力机械、鸟的飞翔原理等问题;17世纪,帕斯卡阐明了静止流体中压力的概念。但流体力学尤其是流体动力学作为一门严密的科学,却是随着经典力学建立了速度、加速度、力、流场等概念,以及质量、动量、能量三个守恒定律的奠定之后才逐步形成的。

17世纪,力学奠基人牛顿研究了流体中运动物体所受到的阻力,得到阻力与流体密度、物体迎流截面积以及运动速度的平方成正比的关系。他针对粘性流体运动时的内摩擦力也提出了牛顿粘性定律。法国人皮托发明了测量流速的皮托管;达朗贝尔对运河中船只的阻力进行了许多实验工作,证实了阻力同物体运动速度之间的平方关系;瑞士的欧拉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,建立了欧拉方程,用微分方程组正确地描述了无粘流体的运动;伯努利从经典力学的能量守恒出发,研究供水管道中水的流动,精心地安排了实验并加以分析,得到了流体定常运动下的速度、压力、管道扬程之间的关系——伯努利方程。

欧拉方程和伯努利方程的建立,是流体动力学作为一个分支学科建立的标志,从此进入了用微分方程和实验测量进行流体运动定量研究的阶段。

从18世纪起,势流理论有了很大进展,在水波、潮汐、涡旋运动、声学等方面都阐明了很多规律。法国的拉格朗日对于无旋运动,德国赫尔姆霍兹对于涡旋运动都作了不少研究……。

19世纪,工程师们为了解决许多工程问题,开始研究有粘性影响的流动问题。1823年,纳维建立了不可压缩粘性流体的基本运动方程;1829年,泊松导出了可压缩粘性流体的运动方程;1845年,斯托克斯又以更合理的基础导出了这个方程,并将其所涉及的宏观

力学基本概念论证得令人信服。这组方程就是沿用至今的纳维-斯托克斯方程(简称 N-S 方程),它是流体动力学的理论基础。普朗特学派又从推理、数学论证和实验测量等各个角度建立了边界层理论,能实际计算简单情形下,边界层内的流动状态和流体同固体间的粘性力。

20 世纪初,飞机的出现极大地促进了空气动力学的发展。航空事业的发展,期望能够揭示飞行器周围的压力分布、飞行器的受力状况和阻力等问题,这就促进了流体力学在实验和理论分析方面的发展。20 世纪初,以儒科夫斯基、恰普雷金、普朗克等为代表的科学家,开创了以无粘不可压缩流体势流理论为基础的机翼理论,阐明了机翼怎样才会受到升力,从而空气能把很重的飞机托上天空。机翼理论的正确性,使人们重新认识无粘流体的理论,肯定了它指导工程设计的重大意义。

机翼理论、边界层理论的建立和发展是流体力学的一次重大进展,它使无粘性流体理论同粘性流体的边界层理论很好地结合起来。随着汽轮机的完善和飞机飞行速度提高到 50m/s 以上,又迅速扩展了从 19 世纪就开始的对空气密度变化效应的实验和理论研究,从而为高速飞行提供了理论指导。

20 世纪 40 年代以后,由于喷气推进和火箭技术的应用,飞行器的速度超过了声速,进而实现了航天飞行,促进了高速流动研究的快速发展,形成了气体动力学、物理-化学流体动力学等分支学科。

以这些理论为基础,20 世纪 40 年代,关于炸药或天然气等介质中发生的爆轰波又形成了新的理论,为研究原子弹、炸药等起爆后,激波在空气或水中的传播发展了爆炸波理论。

此后,流体力学又发展了许多分支,如高超声速空气动力学、超声速空气动力学、稀薄空气动力学、电磁流体力学、计算流体力学、两相(气液或气固)流等。

20 世纪 50 年代起,电子计算机技术的不断发展,使原先采用理论分析方法难以进行研究的课题,能够采用数值计算方法进行研究,并建立了计算流体力学(CFD)这门新兴分支学科,这门学科方兴未艾,正发挥着越来越重要的作用。

从 20 世纪 60 年代起,流体力学开始了和其他学科的互相交叉渗透,形成新的学科或边缘学科,如物理-化学流体动力学、磁流体力学等;原来基本上只是定性描述的问题,逐步得到定量的研究,生物流变学就是一个例子。

1.3 流体的连续介质假设

连续介质假设是研究流体运动的基础。

1. 连续介质假设

根据物质结构理论,流体是由许多不连续的、存在一定间隔距离的分子组成的;流体分子始终处于不规则运动之中,相互间存在碰撞,进行着质量、动量和能量的交换。所以从微观角度看,流体的物理量在空间和时间上都是不连续的。但从宏观而言,人们用肉眼或仪器测量到的流体物理量却又明显地表现出连续性和稳定性。

流体力学研究流体的宏观运动,其研究对象不是物质粒子本身,而是从这些物质抽象出来的物质模型——连续介质。连续介质假设:流体是以质点的形式连续地、无间隙地分

布在流体所占有的空间,流体质点宏观物理量是空间点及时间的连续函数。所谓流体质点,是由相当数量分子组成的流体微团,它在微观上充分大,宏观上又充分小。

2. 假设合理性

流体的连续介质假设在许多情况下是合理的。在通常遇到的问题中,流体质点在很多情况下,其体积微观大、宏观小;其时间微观长、宏观短。例如,在标准状态(0℃, 1atm)下,1mm³体积内包含 2.69×10^{16} 个空气分子, 3.4×10^{19} 个水分子。这样的体积在微观上是非常大的,这样庞大数量的分子数足以使流体物理量达到稳定的平均值,而从宏观看则是很小的,通常情况下,完全可以将这一流体微团视为空间上的一个几何点。另一方面,在上述情况下,气体分子在 10^{-6} s 内要碰撞 10^{14} 次,这样的时间在微观上足够长而从宏观看则是一瞬间。实验和实践表明,基于连续介质假设而建立起来的流体力学理论在大多数情况下是正确的。然而连续介质假设也有限制,其适用条件为

$$\frac{l}{L} \ll 1$$

式中 l ——流体分子平均自由行程;

L ——研究对象特征长度(如船舶的长度、管道的直径等)。

例如,空气在标准状态下气体分子平均自由行程约为 7×10^{-6} cm,在 120km 高空处,气体分子平均自由行程约为 1.3m,洲际弹道导弹在这稀薄空气中飞行时,连续介质假设就不成立。

1.4 流体的主要物理性质

流体作为一类物质,有其内在的物理特性。下面将对流体的物理性质作必要的阐述和讨论。

1.4.1 流体的流动性

流体静止时不能承受任何剪切应力的作用,只要受到微小的剪切作用,流体就会发生流动和变形。流体静止时不能承受剪切力、不能抵抗剪切变形的性质称为流体的“流动性”。流动性是流体的固有特性,是流体与固体的根本区别。

1.4.2 流体密度、比重与比容

根据牛顿第一运动定律,任何物体都具有惯性,即物体所具有的保持其原有运动状态不变的特性。表示物体惯性大小的物理度量是“质量”。流体和其他物体一样,也具有质量。由于流体力学问题所涉及的流体域大都是无比宽广的,因此不用流体的总质量来描述流体运动的惯性,而用其他物理量,如密度或比重等来替代。

1. 密度 ρ

密度是单位体积流体的质量,它是描述流体质量在空间分布的物理量。用下式来定义某一流体体积 δV 中的平均密度 $\bar{\rho}$:

$$\bar{\rho} = \frac{\delta m}{\delta V} \quad (1-4-1)$$

式中 δm 为 δV 中所含流体的质量。流场中任一点 M 的流体密度定义为

$$\rho_M = \lim_{\delta V \rightarrow 0} \frac{\delta m}{\delta V} = \frac{dm}{dV} = \rho(x, y, z, t) \quad (1-4-2)$$

流体的密度单位(量纲)为 kg/m^3 。

2. 比重 s

在一些工程问题中,还经常用到“比重”的概念。流体的比重是该流体的重量与同体积的水在 4°C 时的重量之比,或该流体的密度与 4°C 水的密度之比,即

$$s = \frac{\rho_f}{\rho_{w4^\circ\text{C}}} \quad (1-4-3)$$

3. 比容 v_s

比容是密度的倒数,即单位质量流体所占有的体积:

$$v_s = \frac{1}{\rho} \quad (1-4-4)$$

其单位为 m^3/kg 。

流体的密度值,除依流体种类不同外,还随温度和压强的变化而变化。实验证明,液体的密度变化甚微,而气体的变化较液体的大。在常温 15°C , 一个标准大气压 ($1.01325 \times 10^5 \text{ Pa}$) 下,淡水、海水和空气的密度分别为 $999.04 \text{ kg}/\text{m}^3$, $1025.9 \text{ kg}/\text{m}^3$ 和 $1.226 \text{ kg}/\text{m}^3$ 。

1.4.3 流体的粘性和牛顿内摩擦定律

1. 粘性

图 1-4-1 表示的是流体粘性作用对流体速度分布的影响。流体以均匀分布速度 v_0 流过固体表面,可以通过测量得知,紧靠壁面处的流体速度为零,紧靠静止流体的另一层因受迟滞作用而速度降低,同时这种作用逐层向外传播,速度降低的流体厚度 δ 沿着流动方向逐渐增加,这种速度的迟滞作用是由流体粘性引起的,在内部产生了摩擦剪切力,这种内部摩擦力称为“内摩擦力”。

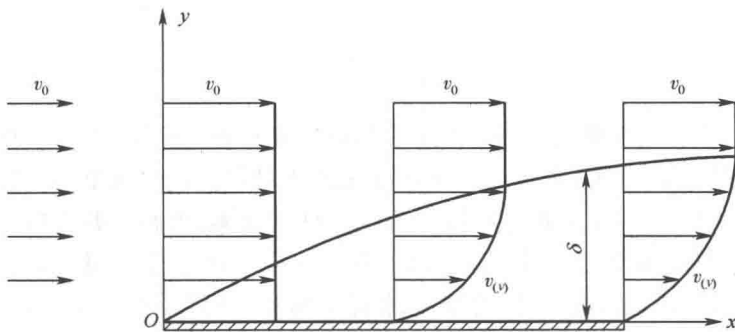


图 1-4-1 流体粘性对流体运动的影响

粘性的定义:流体运动时,具有抵抗剪切变形的能力。粘性是流体的固有属性。

2. 牛顿内摩擦定律

最先由 Newton 于 1686 年对流体粘性进行了定量研究,其实验示意图见图 1-4-2,

上、下两板无限长,下板固定,上板以常力 F 拖动,上板上流体以恒速 U 移动。当拖动速度 U 不是很大时,两板之间的流体速度变化规律近似为线性,如图中所示。

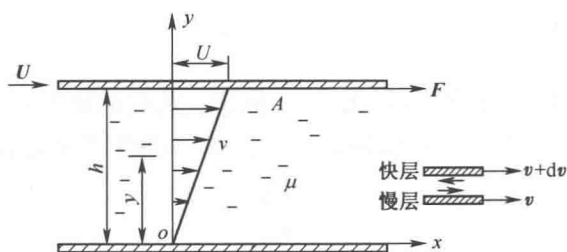


图 1-4-2 牛顿内摩擦定律实验用图

经实验发现

$$\tau = \frac{F}{A} = \mu \frac{U}{h} \quad (1-4-5)$$

式中 A —— 上板面积;
 F —— 拖力;
 U —— 拖移速度;
 h —— 两板间距;
 μ —— 比例系数。

若速度分布为非线性,即 $v = v(y)$, 则

$$\tau = \mu \frac{dv}{dy} \quad (1-4-6)$$

上式即为牛顿内摩擦定律。

3. 粘性系数

式(1-4-6)中的比例系数 μ 称为流体的“动力粘性系数”,其单位为 $\text{Pa} \cdot \text{s}$ ($\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$)。在流体力学中,除了用动力粘性系数外,还常用到运动粘性系数 ν (单位: m^2/s),两者的关系为

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (1-4-7)$$

实验表明:流体粘性系数 μ 与温度 T 和压强 p 都有关,但温度 T 的影响显著。通常认为水和空气的粘性系数与压强无关。油液在压强不是很大的情况下(小于 200 大气压范围内),也可不考虑其粘性系数与压强的关系。对于液体,当温度升高时,其粘性系数减小,而气体正好与液体相反。原因是液体的粘性主要取决于分子间的集结力(内聚力),当温度升高时,液体分子的振荡速度增加,集结力减小,从而加大了流动性;气体的 μ 主要取决于分子不规则运动中相互碰撞的频率,当温度上升时,分子热运动加剧,动量交换加快,从而气体的粘性也就增加。表 1-4-1 给出了空气、淡水和海水在不同温度下的密度和粘性系数,图 1-4-3 给出了空气和水运动粘性系数随温度的变化。

表 1-4-1 空气、淡水和海水在不同温度下的密度和粘性系数(第 10 届 ITTC 提供)

温度 t /°C	空气		淡水		海水	
	ρ /($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	$\nu \times 10^5$ /($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)	ρ /($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	$\nu \times 10^6$ /($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)	ρ /($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	$\nu \times 10^6$ /($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)
0	1.293	1.320	999.82	1.7867	1028.07	1.8284
4			999.92	1.5656	1027.77	1.6094
5	1.270	1.376	999.92	1.5170	1027.68	1.5614
8			999.82	1.3847	1027.19	1.4310
10	1.247	1.419	999.63	1.3064	1026.89	1.3538
12			999.43	1.2350	1026.60	1.2832
14			999.14	1.1696	1026.11	1.2186
15	1.226	1.455	999.04	1.1390	1025.91	1.1883
16			998.94	1.1097	1025.71	1.1592
18			998.55	1.0546	1025.22	1.1044
20	1.205	1.500	998.16	1.0337	1024.73	1.0537
22			997.76	0.9568	1024.15	1.0068
25	1.184	1.556	996.78	0.8731	1022.97	0.9226
28			996.20	0.8357	1022.28	0.8847
30	1.165	1.600	995.61	0.8009	1021.69	0.8493

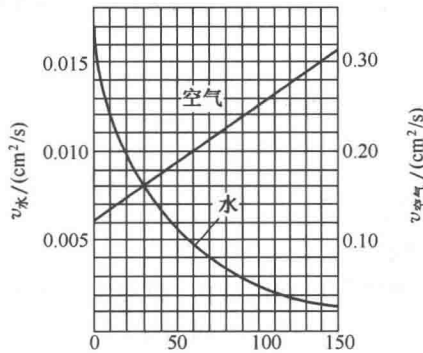


图 1-4-3 水和空气的运动粘性系数随温度的变化

为了便于数值计算,这里分别给出估算水和气体动力粘性系数的经验公式。

(1) 水的动力粘性系数随温度变化的关系(泊肃叶公式):

$$\mu = \mu_0 \left(\frac{1}{1 + 0.03368t + 0.000221t^2} \right) \quad (1-4-8)$$

式中 μ —— $t^\circ\text{C}$ 时的动力粘性系数;

μ_0 —— 0°C 时的动力粘性系数。

(2) 气体的动力粘性系数随温度变化的关系:

$$\mu = \mu_0 \frac{273 + C}{T + C} \left(\frac{T}{273} \right)^{\frac{3}{2}} \quad (1-4-9)$$