



“十二五”职业教育国家规划教材
经全国职业教育教材审定委员会审定

工程流体力学 (第三版)

孙丽君 主 编

王海瑛 侯 涛 副主编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



“十二五”职业教育国家规划教材
经全国职业教育教材审定委员会审定

工程流体力学 (第三版)

主 编 孙丽君
副主编 王海瑛 侯 涛
编 写 杜雅琴
主 审 幸福堂 邹文华



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书为“十二五”职业教育国家规划教材。

本书系统地阐述了流体的性质、流体静止和运动的基本规律,着重介绍了流体一元管流流动的基本规律,侧重工程实例和管道计算等方面的内容,同时对平面运动、气体动力学基础知识进行了介绍。

本书可作为高职高专电力技术类热能与动力装置专业和火电厂集控运行专业的教材,也可作为电力职工大学和高等院校成人教育、函授相应专业的教材,还可供有关专业技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

工程流体力学/孙丽君主编. —3 版. —北京: 中国电力出版社, 2014. 8

“十二五”职业教育国家规划教材

ISBN 978-7-5123-5976-5

I. ①工… II. ①孙… III. ①工程力学-流体力学-职业教育-教材 IV. ①TB126

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 117636 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

北京市同江印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2005 年 8 月第一版

2014 年 8 月第三版 2014 年 8 月北京第十四次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 13.25 印张 316 千字

定价 25.00 元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签,刮开涂层可查询真伪

本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

前 言

本书第一版为教育部职业教育与成人教育司推荐教材,2010年修订为第二版,第三版被评为“十二五”职业教育国家规划教材。

本教材因针对性强、容量适中,符合高职高专的教育要求,经过近几年的使用,受到广大读者欢迎。同时,编者收到了许多老师和学生们的意见和建议。此次修订,主要是在第二版的基础上进行修订、补充和完善。

本教材除了继续注重于流体力学基本知识的阐述、理论上的公式推导大量简化外,重点补充了实际现场实例并修订了一些习题,按照必需、够用的原则,强调基础理论的同时又注重结合后续专业课程的内涵,有针对性地介绍了流体力学的基础知识。为了加深读者对流体力学中涉及的概念、现象的理解,提高学习兴趣,本次修订增加了12个课外阅读,分别列于部分章节之后。

本书的绪论、第三章第五~第八节、第四章和课外阅读由郑州电力高等专科学校孙丽君编写,第一、二章和第三章的第一~第四节由保定电力职业技术学院王海瑛编写,第五、第六章由郑州电力高等专科学校侯涛编写,本教材再版补充了配套的电子教案(见 <http://jc.cepp.sgcc.com.cn>),由郑州电力高等专科学校杜雅琴老师制作。本书由孙丽君主编,侯涛、王海瑛任副主编。

本书在修订过程中参考了有关教材和文献资料,得到了其他院校老师和企业技术人员的大力支持,在此表示衷心的感谢。

编 者

2014年7月

第一版前言

本书为教育部职业教育与成人教育司推荐教材,是根据教育部审定的电力技术类专业主干课程的教学大纲编写而成的,并列入教育部《2004~2007年职业教育教材开发编写计划》。本书经中国电力教育协会和中国电力出版社组织专家评审,又列为全国电力职业教育规划教材,作为职业教育电力技术类专业教学用书。

本书体现了职业教育的性质、任务和培养目标;符合职业教育的课程教学基本要求和有关岗位资格和技术等级要求;具有思想性、科学性、适合国情的先进性和教学适应性;符合职业教育的特点和规律,具有明显的职业教育特色;符合国家有关部门颁发的技术标准。本书既可以作为学历教育教学用书,也可作为职业资格和岗位技能培训教材。

本教材主要作为高职高专热动力类、集控类专业工程流体力学教材使用,也可作为现场岗位培训和岗前培训使用教材,同时也可作为相关专业技术人员的参考书目。

鉴于本课程的性质和使用对象,编写本教材时,按照必需够用的原则,简化了理论上的公式推导,并以大量的生活事例、自然现象和大型火电机组所涉及的仪表设备为实例,在强调基础理论知识的同时,注重结合后续专业课程(如锅炉设备及运行、汽轮机设备及运行、泵与风机等)的知识要点,系统地、有针对性地介绍了流体力学基础知识。

本书的第一章、第二章和第三章的部分内容由保定电力职业技术学院王海瑛编写,绪论、第三章部分内容和第四章由郑州电力高等专科学校孙丽君编写,第五章、第六章由郑州电力高等专科学校侯涛编写。本书由孙丽君担任主编,侯涛担任副主编。

武汉科技大学化工与自然环境学院幸福堂副教授和河南电力试验研究院邹文华高级工程师担任本书主审。二位审稿老师花费了大量的时间和精力从不同的侧面提出了很多宝贵的意见。幸福堂老师在篇幅裁减、内容表述、文字校核方面,做了细致严密的审核,邹文华高级工程师提供了许多现场技术资料。同时,本书在编写过程中参考了有关教材和文献资料,得到了其他院校老师和企业技术人员的大力支持,在此表示衷心的感谢。

限于编者水平,书中不当之处,恳请读者斧正。

编者

2005年5月

目 录

前言	
第一版前言	
绪论	1
课外阅读	3
第一章 流体及流场的基本性质	7
第一节 流体的概念	7
第二节 流体的物理性质	7
第三节 流体的表面性质	17
第四节 流场 连续性假定	19
思考题	22
习题	23
课外阅读	25
第二章 流体静力学	27
第一节 作用在流体上的力	27
第二节 静压力的概念和表示方式	29
第三节 流体平衡微分方程 等压面	35
第四节 流体静力学基本方程式	38
第五节 流体静力学基本方程式的应用	42
第六节 流体的相对平衡	53
第七节 静止流体对固体壁面的压力	58
思考题	64
习题	65
课外阅读	72
第三章 理想流体流动的基本规律	75
第一节 描述流体流动的方法	75
第二节 迹线与流线	78
第三节 系统与控制体	82

第四节	流场的分类	85
第五节	流体流动的连续性方程式——质量守恒定律	88
第六节	流体流动的伯努利方程式——能量守恒定律	90
第七节	流体的动量方程式	103
第八节	流体的动量矩方程式	109
思考题		111
习题		112
课外阅读		116
第四章	黏性流体的运动规律	117
第一节	流体流动的两种状态 层流和紊流	117
第二节	圆管内的层流流动规律	121
第三节	圆管内的紊流流动规律	123
第四节	沿程阻力损失的分析和计算	125
第五节	局部阻力损失的分析计算和减少阻力损失的措施	129
第六节	管道及管网的水力计算	135
第七节	计算机编程在管道计算中的应用	144
第八节	水击现象	152
思考题		154
习题		155
第五章	流体平面运动规律	160
第一节	微元流团运动的形式	160
第二节	有旋运动 有旋运动的性质	162
第三节	平面对称运动 无旋运动的基本性质	166
第四节	边界层的基本概念	168
第五节	边界层的分离	170
第六节	绕流阻力与升力	172
第七节	叶型与叶栅	174
第八节	自由淹没射流	177
思考题		179
习题		180
课外阅读		180
第六章	气体动力学基础	183

第一节	微弱扰动波的传播及声速	183
第二节	微弱扰动波在流场中的传播 马赫数	185
第三节	可压缩一元定常管流基本方程式	188
第四节	参考状态	190
第五节	激波	192
第六节	渐缩喷嘴和缩放喷嘴的工作原理	196
思考题		199
习题		200
参考文献		201

绪 论

流体力学是力学的一个分支。根据研究对象不同,力学大致分为以受力后不变形的绝对刚体为研究对象的理论力学,以受力后产生微小有限变形的固体为研究对象的固体力学,以受力后产生较大变形的流体为研究对象的流体力学。

流体力学是研究流体的平衡和运动规律,以及流体与约束其流动的固体壁面之间相互作用的一门学科。流体力学属于物理学的范畴,是一门理论与实验紧密结合的学科。

物理学从不同角度来研究流体。从流体分子的微观结构和热运动概念出发,运用概率统计方法来解释和揭示流体宏观现象和运动规律的本质,属于分子物理学研究范畴;以观测和实验为依据,从能量观点出发,分析流体在状态和相态变化过程中有关热、功、能转换的关系和条件,属于热力学研究的内容。

流体力学研究由于外部原因而影响流体平衡与运动的规律。研究中,我们也是从宏观角度来对流体运动现象进行观察,分析流体运动过程中力(动量、动能)与运动(位移、速度、加速度)之间的制约关系。

流体力学与其他自然科学的成长过程相同,它们都是人类在实践活动中,认识和总结流体的规律而发展成为自然科学的一个重要分支学科。

公元前 20 世纪,中国、古埃及、古希腊和古罗马等古国的劳动人民,已在水利灌溉、城市供水、造船和航运中积累了丰富的水力学知识。最早的流体力学研究文献是阿基米德(公元前 250 年左右)的《论浮体》一书,揭示了有关“浮力”的基本定律。

文艺复兴时期的著名艺术家和物理学家达·芬奇曾系统地研究过沉浮、孔口出流、物体运行阻力、流体在管道和水渠中流动等问题。1510 年他发明的离心抽水机,已具有现代离心泵的雏形。他的《论水的流动和水的测量》一文将水利工程和流体力学问题结合起来研究,在他逝世 400 多年后仍能发表。

达·芬奇以后,很多科学家对流体力学基础理论作出了巨大贡献,流体力学开始了快速的发展:1612 年伽利略建立了沉浮的基本理论;1586 年斯蒂芬建立了液体压力和连通器定律,解释了“静水奇象”;1643 年托里拆利发明了水银气压计,论证了孔口出流基本规律;1650 年帕斯卡证明了流体中压力传递的基本定理。在这个时期基本建立了流体静力学的基础理论。1686 年牛顿建立了流体内摩擦定律。另外,牛顿、伽利略等人对有关阻力的一系列问题的研究,为流体力学学科的建立准备了条件。

流体力学成为一门独立的学科,始于 18 世纪。科学家对流体流动问题进行了很多理论分析,但是某些理论与实际之间还存在着很大的差异,其结论甚至完全相反,如达朗贝尔提出,当一个无限长的圆柱在理想流体中运动时,流体没有对物体产生阻力,其结果与实际不符,这就是所谓的“达朗贝尔疑题”。因此,对流体流动问题的研究出现了两种不同的方法,一个是以严密的理论分析为主,另一个是以实验研究为主。

18 世纪以来,大批科学家对流体力学作出了卓越贡献。伯努利首先采用“流体动力学”这一术语,他通过实验和理论推导,总结出流体流动过程中能量转换的基本关系,即著名的

伯努利方程。达朗贝尔根据质量守恒定律,提出了流体流动的连续方程。欧拉在 1755 年导出了描述流体运动的著名的欧拉方程,被人们誉为古典流体力学的创始人。拉格朗日发展了欧拉理论。纳维尔和斯托克斯导出了黏性流体运动方程,他俩被视为近代流体动力学的理论奠基人。之后,亥姆霍兹和克希霍夫在旋涡运动和分离流动的理论实验方面进行了大量研究,从而解决了许多理论与实验结果之间的矛盾。

19 世纪末,工业生产蓬勃发展,加速了流体力学和水力学的发展。工业领域不仅有水的流动问题,而且还涉及其他种类流体的流动问题。对其他流体的研究促进了相似理论的发展。雷诺提出了层流与紊流的概念,找出判别流动状态的重要参数——雷诺数,为流动阻力和能量损失研究奠定了基础。同时,瑞利运用相似理论和量纲分析,解决了流体力学中大量的关键问题。1904 年普朗特提出了边界层理论,对黏性流体力学模型的建立起了很大的作用。同时,航空工业和动力工业的兴起促进了空气动力学的发展,使其成为流体力学的一个重要分支。儒可夫斯基创立了机翼升力理论,对螺旋桨和机翼的研究作出了杰出的贡献。20 世纪初,紊流理论、可压缩流体运动理论、高速空气动力学的研究获得了巨大的成就。20 世纪 50 年代以后,随着宇宙航行、原子能工业的发展,稀薄动力气体学、电磁流体力学也成为新的流体力学分支。近年来,由于高分子材料、生态环境保护等学科发展的需要,非牛顿流体力学、多相流体力学、生物流体力学、气动噪声流体力学也在创立和发展中。

流体力学是一门基础性很强和应用性很广的学科,它的研究对象随着生产的需要与科学的发展在不断地更新、深化和扩大。20 世纪 60 年代以前,它主要是围绕航空、航天、大气、海洋、航运、水利等方面,研究流体运动中的动量传递问题,即局限于研究流体的运动规律,研究流体与固体、液体或大气界面之间的相互作用力问题。20 世纪 60 年代以后,能量、环境保护、化工和石油等领域中的流体力学问题,逐渐受到重视。近年来,流体的对流传热、传质问题受到高度重视,并获得巨大发展。这样,流体力学的研究对象,从流体的动量传递扩展到它的热量与质量传递,也就是说,除了研究流体的运动规律以外,还要研究它的传热、传质规律。同样,在固体、液体或气体界面处,不仅研究相互之间的作用力,而且需要研究它们之间的传热、传质规律。

流体力学与我国现代化建设有着密切的联系。例如:研究大气和海洋运动可以作好天气与海情预报,以便为农业、渔业、航空、航海、国防和人民生活服务;研究各种空间飞行物体,如飞机、人造卫星、导弹、炮弹,以及各种水上或水下运动物体,如船舶、潜艇、鱼雷等的运动,可以了解它们与空气和水的动力性能,以便获得阻力小、稳定性高的最佳物体外形;研究河流、渠道和各种管路系统内的流动,可以掌握它们的运行规律,特别是它们与各种壁面之间的作用力,以便获得耗能少、安全性高的工程设计;研究核反应堆、动力设备中的冷却系统,如热交换器、水暖系统以及各种化工设备中的流动系统,不仅可以了解它们的运动规律,而且可以掌握它们在壁面的传热、传质规律等。此外,油田气田的开发、地下水的利用以及机械的润滑等,均与流体力学密切相关。特别是近几十年来,流体力学与相邻学科相结合,发展了许多新的交叉分支学科,大大充实了流体力学的研究内容,扩大了它的研究应用领域。

按 GB 3102—1993 规定,流体力学中有关的物理量采用以国际制单位(SI 单位)为基础制订的法定单位。除特殊说明的有关公式外,本书所有公式和计算均采用法定计量单位,故在实际应用时,必须将计算单位换算成法定计量单位,才能正确应用书中的所有公式。

与流体力学有关的各种物理量的法定单位及符号列于表 0-1 中。

表 0-1 流体力学有关物理量的符号、法定单位

量的名称	量的符号	单位名称	单位符号	备 注
长度	l, L	米	m	SI 基本单位
质量	m	千克	kg	SI 基本单位
时间	t	秒	s	SI 基本单位
热力学温度	T	开 [尔文]	K	SI 基本单位
摄氏温度	t, θ	摄氏度	℃	SI 辅助单位
[平面] 角	$\alpha, \beta, \gamma, \theta, \varphi$	弧度, 度	rad, °	SI 辅助单位 $1^\circ = \pi/180 \text{ rad}$
面积	$A, (S)$	平方米	m^2	SI 导出单位
体积	V	立方米	m^3	SI 导出单位
速度	u, v, w, c	米每秒	m/s	SI 导出单位
加速度	a	米每二次方秒	m/s^2	SI 导出单位
力 重量	F $W, (P, G)$	牛 [顿]	N	SI 导出单位
压力, 压强 正应力 切应力	p σ τ	帕 [斯卡]	Pa	SI 导出单位
[质量] 密度	ρ	千克每立方米	kg/m^3	SI 导出单位
[动力] 黏度	η	帕 [斯卡] 秒	$\text{Pa} \cdot \text{s}$	SI 导出单位
运动黏度	ν	二次方米每秒	m^2/s	SI 导出单位
转速, 旋转频率	n	每秒	s^{-1}	SI 导出单位
能 [量] 功 热量	E $W, (A)$ Q	焦 [耳]	J	SI 导出单位
功率	P	瓦 [特]	W	SI 导出单位
动量	p	千克米每秒	$\text{kg} \cdot \text{m/s}$	SI 导出单位
弹性模量	E	帕 [斯卡]	Pa	SI 导出单位
力矩	M	牛顿米	$\text{N} \cdot \text{m}$	SI 导出单位

课 外 阅 读



贡献突出的科学家

阿基米德 (Archimedes, 公元前 287—公元前 212), 古希腊哲学家、数学家、物理学家、力学家, 静态力学和流体静力学的奠基人。他在亚历山大里亚时期发明了阿基米德式螺旋抽水机。后来阿基米德成为数学家与力学家, 并享有“力学之父”的美称。

列奥纳德·达·芬奇 (Leonardo. da. Vinci, 1452—1519), 意大利文艺复兴三杰之一, 也是整个欧洲文艺复兴时期最完美的代表。他是画家、天文学家、发明家、医学家、建筑工程师和军事工程师。他设计建造了一个小型水渠, 系统地研究了物体的沉浮、孔口出流、物体的运动阻力以及管道、明渠中水流等问题。

斯蒂芬 (Stevin, 1548—1620), 荷兰数学家、工程学家。斯蒂芬的著作非常丰富, 涉及数学、力学、天文学、航海学、地理学、建筑学、工程学、军事科学、音乐理论等多种学科。1586 年曾做实验证明两个重量不同的球同时落下, 同时到地, 时间比伽利略还早。在流体静力学原理中, 提出流体静力学悖论。

伽利略·伽利雷 (Galileo Galilei, 1564—1642), 16~17 世纪的意大利物理学家、天文学家、比萨大学教授。伽利略发明了摆针和温度计, 他在科学上为人类作出巨大贡献, 是近代实验科学的奠基人之一, 他被誉为“近代力学之父”、“现代科学之父”和“现代科学家的第一人”。在流体静力学中应用了虚位移原理, 并首先提出运动物体的阻力随着流体介质密度的增大和速度的提高而增大。

托里拆利 (Torricelli, 1608—1647), 意大利物理学家、数学家。他在流体力学方面提出了液体从小孔射流的定理, 他还解释过风的成因起源于空气的密度与温度差。在静力学方面, 托里拆利发现: 一个物体系统, 当其重心处在最低位置时, 发生小位移时重心下降, 系统才是稳定的。

帕斯卡 (B. Pascal, 1623—1662), 法国数学家、物理学家、哲学家、散文家。1646 年, 他制作了水银气压计, 撰写了液体平衡、空气的重量和密度等方向的论文, 提出了密闭流体能传递压强的原理——帕斯卡原理。

牛顿 (I. Newton, 1642—1727) 爵士, 英国皇家学会会员, 英国伟大的物理学家、数学家、天文学家、自然哲学家, 于 1687 年出版了《自然哲学的数学原理》。研究了物体在阻尼介质中的运动, 建立了流体内摩擦定律, 初步奠定了黏性流体力学的理论基础, 并讨论了波浪运动等问题。

伯努利 (D. Bernoulli, 1700—1782), 瑞士物理学家、数学家、医学家, 著有《流体动力学》, 建立了流体势能、压强势能和动能之间的能量转换关系——伯努利方程。

欧拉 (L. Euler, 1707—1783) 瑞士数学家、自然科学家。他不但在数学上作出伟大贡献, 而且把数学用到了几乎整个物理领域, 他是刚体力学和流体力学的奠基者、弹性系统稳定性理论的开创人。小行星欧拉 2002 就是为了纪念欧拉而命名的。他写了大量的力学、分析学、几何学、变分法的课本, 《无穷小分析引论》、《微分学原理》、《积分学原理》都成为数学中的经典著作。他创立了微分方程这门学科, 引入了空间曲线的参数方程, 给出了空间曲线曲率半径的解析表达式。

达朗伯 (J. le R. d' Alembert, 1717—1783), 法国著名的物理学家、数学家和天文学家。1744 年提出了达朗伯疑题 (又称为达朗伯佯谬), 即在理想流体中运动的物体既没有升力也没有阻力。从反面说明了理想流体假定的局限性。

谢才 (A. Chezyap, 1718—1798), 法国水力工程师。他参与了巴黎学多桥梁与街道的施工和验收, 并对法国的运河建设, 尤其是连接塞纳河与罗纳河流域的勃垠第运河进行了研究。他逝世的当年被任命为桥梁与公路学院的院长。他在水力学上的主要贡献是提出了明渠均匀流公式——谢才公式。

纳维 (L. Navier, 1785—1836), 法国人, 他首先提出了不可压缩黏性流体的运动微分方程组, 并由斯托克斯导出, 称为纳维-斯托克斯方程。

拉格朗日 (J. L. Lagrange, 1736—1813), 法国著名数学家、物理学家。他提出了新的流体力学微分方程, 使流体力学的解析方法有了进一步发展。

弗劳德 (W. Froude, 1810—1879), 英国船舶设计师, 对船舶阻力和摇摆的研究颇有贡献, 他提出了船模试验的相似准则数——弗劳德数, 建立了现代船模试验技术的基础。

斯托克斯 (George Gabriel Stokes, 1819—1903), 英国数学家、物理学家。斯托克斯在对光学和流体动力学进行研究时, 推导出了在曲线积分中最有名的被后人称之为“斯托克斯公式”的定理。直至现代, 此定理在数学、物理学等方面都有着重要而深刻的影响。

亥姆霍兹 (H. von Helmholtz, 1821—1894), 德国生物物理学家、数学家与德国物理学家基尔霍夫 G. R. Kirchhoff, 1824—1887) 一起对旋涡运动和分离流动进行了大量的理论分析和实验研究, 提出了表征旋涡基本的旋涡定理、带射流的物体绕流阻力等学术成就。

雷诺 (O. Reynolds, 1842—1912), 英国力学家、物理学家和工程师。1868 年出任曼彻斯特欧文学院 (后改名为维多利亚大学) 的首席工程学教授。1877 年当选为皇家学会会员。1883 年用实验证实了黏性流体的两种流动状态——层流和紊流的客观存在, 找到了实验研究黏性流体流动规律的相似准则数——雷诺数, 以及判别层流和紊流的临界雷诺数, 为流动阻力的研究奠定了基础。

瑞利 (L. J. W. Reyleigh, 1842—1919), 英国科学家, 在相似原理的基础上, 提出了实验研究的量纲分析法中的一种方法——瑞利法。

儒科夫斯基 (Н. Е. Жуковский, 1847—1921), 俄国空气动力学家, 航空科学的开拓者。从 1906 年起, 发表了《论依附涡流》等论文, 找到了翼型升力和绕翼型的环流之间的关系, 建立了二维升力理论的数学基础。他还研究过螺旋桨的涡流理论以及低速翼型和螺旋桨桨叶剖面等。

库塔 (M. W. Kutta, 1867—1944), 德国数学家, 1902 年曾提出过绕流物体上的升力理论, 但没有在通行的刊物上发表。

普朗特 (L. Prandtl, 1875—1953), 德国力学家, 近代力学奠基人之一, 建立了边界层理论, 解释了阻力产生的机制。以后又针对航空技术和其他工程技术中出现的紊流边界层, 提出混合长度理论。1918~1919 年间, 论述了大展弦比的有限翼展机翼理论, 对现代航空工业的发展作出了重要的贡献。

卡门 (Theodore von Karman, 1881—1963), 匈牙利裔美国数学家、物理学家。近代力学奠基人之一。在 1911~1912 年连续发表的论文中, 提出了分析带旋涡尾流及其所产生的阻力的理论, 这种尾涡的排列被称为卡门涡街。在 1930 年提出了计算紊流粗糙管阻力系数的理论公式。在紊流边界层理论、超声速空气动力学、火箭及喷气技术等方面都有不少贡献。

周培源 (Zhou Peiyuan, 1902—1993), 中国著名流体力学家、理论物理学家、教育家和社会活动家。多年从事紊流统计理论的研究, 取得了不少成果, 1975 年发表在《中国科学》上的《均匀各向同性湍流的涡旋结构的统计理论》便是其中之一。

钱学森 (Qian Xuesen, 1911—2009), 世界著名科学家, 空气动力学家, 中国载人航天奠基人, 中国科学院及中国工程院院士。1938 年, 提出了平板可压缩层流边界层的解

法——卡门-钱学森解法。他在空气动力学、航空工程、喷气推进、工程控制论等技术科学领域做出过许多开创性的贡献。

吴仲华 (Wu Zhonghua, 1917—1992), 中国工程热物理学家。中国科学院院士。在 1952 年发表的《在轴流式、径流式和混流式亚声速和超声速叶轮机械中的三元流普遍理论》和在 1975 年发表的《使用非正交曲线坐标的叶轮机械三元流动的基本方程及其解法》两篇论文中所建立的叶轮机械三元流理论, 至今仍是国内外许多优良叶轮机械设计计算的主要依据。

第一章 流体及流场的基本性质

第一节 流体的概念

通常将能流动的物质称为流体。从力学的特征讲,流体是一种受任何微小剪切力作用都会连续变形的物质。只要这种力连续作用,流体就将继续变形流动,只有外力停止作用,变形才会停止。这种无限制的变形就是流动。流体不能抵抗剪切变形,只能抵抗变形速度,即对变形速度呈现一定的阻力。流体具有的极易变形的这种特性叫做**流动性**。

自然界中物质的存在形式一般有三种:固体、液体和气体。从宏观的外在现象看,它们之间的主要区别是:固体具有一定的体积,并且有一定的形状;液体具有一定的体积,但没有一定的形状,很容易流动,其形状随容器形状而异,并能形成自由表面;气体没有固定的体积,也没有一定的形状,能充满任何容器。这就是说,液体和气体容易变形,具有易流动性,故统称为流体。固体和液体能承受一定压力,不容易被压缩变形,而气体则容易被压缩变形。

液体、气体和固体所具有的不同的力学特性,从微观来讲,是由于分子之间的距离和分子之间的吸引力不同造成的。固体的分子排列最紧密,分子间的距离很小,分子间的吸引力很大,抵抗变形的能力也很大,所以固体具有抗拉、抗切、抗压的能力;液体的分子排列较松散,分子间的距离较大,分子间的吸引力较小;气体与液体比较起来,分子之间的距离更大,因而分子之间的吸引力更小,它不能约束分子的自由运动,所以气体没有固定不变的体积,总是能够充满它所占据的整个空间。液体分子之间的相互作用表现为无一定方向和周期的无规则振动,虽然分子之间能够做相对移动,但已不能作自由运动了,因此液体有固定的体积,能够承受巨大的压力,不容易被压缩。当液体和气体接触时便会出现液体同气体间的交界面,这种交界面称为液体的**自由表面**。

第二节 流体的物理性质

在研究流体的力学规律之前,必须首先了解流体的基本物理性质,因为流体的平衡与机械运动规律固然与流体外部因素有关,但更主要的是内部因素。鉴于实际流动现象的复杂性,在研究每一个具体物理过程时,往往不是一开始就把所有的内在因素全部考虑进去,而是抓住影响问题本质的最基本因素,忽略一些次要因素,先建立研究的模型,然后再考虑次要因素,对研究结果逐步修正。流体力学正是遵循这样一种普遍的研究规律来解决每一个具体问题而不断发展的。

一、密度和比体积

(一) 密度

按照牛顿定律,流体总是力图保持它原来的运动状态不变,这个性质就是所谓的**惯性**。当流体受外力作用而改变其运动状态时,流体必然产生反抗改变的惯性力。惯性的大小是用

质量来度量的，质量越大，惯性就越大。为了便于比较不同流体惯性的大小，通常用密度来表明流体质量的密集程度。

对于均质流体（流体各点密度相同），单位体积流体内所具有的质量称为密度，用 ρ 表示，则

$$\rho = \frac{m}{V} \tag{1-1}$$

式中 ρ ——流体的密度， kg/m^3 ；
 m ——流体的质量， kg ；
 V ——流体的体积， m^3 。

对于非均质流体（流体各点的密度不完全相同），流体中某点的密度为

$$\rho = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta m}{\Delta V}$$

式中 ΔV ——包含该点的微小流体体积；
 Δm —— ΔV 内的流体质量。

（二）比体积

单位质量的流体所占有的体积称为比体积，用 v 表示，单位为 m^3/kg ，计算公式为

$$v = \frac{V}{m} \tag{1-2}$$

可以看出流体的密度与比体积之间互为倒数关系，即

$$\rho = \frac{1}{v} \tag{1-3}$$

例如：在常温下，水的密度 $\rho=1000\text{kg/m}^3$ ，其比体积 $v=1/1000=0.001\text{ (m}^3/\text{kg)}$ 。

（三）影响流体密度的因素

1. 流体种类

流体的密度是流体的一种天然属性。流体的密度随流体种类不同而异，表 1-1 为几种常见流体的密度值。

表 1-1 常见流体的密度

流体名称	温度 t ($^{\circ}\text{C}$)	密度 ρ (kg/m^3)	流体名称	温度 t ($^{\circ}\text{C}$)	密度 ρ (kg/m^3)
汽油	15~20	700~750	氨	0	0.771
苯	60	873	氮		1.251
甘油	0	1260	空气		1.293
煤油	15	769	氧		1.429
蒸馏水	4	1000	氯		3.217
重油	15	900~950	氢		0.089 9
酒精	15~18	790	甲烷		0.717
水银	0	13 600	一氧化碳		1.250
海水	15	1020~1030	二氧化碳		1.976
乙醚	0	740	乙烯		1.206
甲醇	4	810	二氧化硫		2.925

流体种类不同，其密度差别很大。水的密度（4 $^{\circ}\text{C}$ ）是空气密度（0 $^{\circ}\text{C}$ ）的 773 倍。由此可见，液体的密度比气体的密度大得多，因此当液体与气体共同存在于同一容器或管路之中

时，气体的质量往往可以忽略不计。

2. 温度和压力

流体的密度随压力和温度的变化而变化。这是因为温度和压力变化，流体的体积就要发生变化。一般情况下，液体的密度随压力和温度的变化很小，而气体的密度随压力和温度的变化而变化。表 1-2 列出了不同温度下水的密度值。

表 1-2 不同温度下水的密度 (0.1MPa)

温度 t (°C)	密度 ρ (kg/m ³)	温度 t (°C)	密度 ρ (kg/m ³)	温度 t (°C)	密度 ρ (kg/m ³)
0	999.9	30	995.7	70	977.8
4	1000.0	40	992.2	80	971.8
10	999.7	50	990.1	90	965.3
20	998.2	60	983.2	100	958.4

表 1-3 列出了不同温度下空气和汞的密度。

表 1-3 不同温度下空气和汞的密度 (0.1MPa) kg/m³

温度 t (°C) 流体名称	0	10	20	40	60	80	100
空气	1.29	1.24	1.20	1.12	1.06	0.99	0.94
汞	13 600	13 570	13 550	13 500	13 450	13 400	13 350

当压力和温度变化较小时，液体的密度值变化很小，故通常在压力和温度变化较小时，液体的密度取某一定值，如水的密度，通常是取纯净水在 101.3kPa (1atm) 下、4℃时的密度值，即 $\rho=1000\text{kg/m}^3$ 作为计算值。但当压力和温度变化较大时，液体则要取不同的密度值。气体的密度随压力和温度的变化而变化，其变化关系可以用热力学中的理想气体的状态方程来表示，即

$$\rho_2 = \rho_1 \frac{p_2}{p_1} \frac{T_1}{T_2}$$

(1-4)

当气体的温度不变时，有

$$\frac{\rho_1}{\rho_2} = \frac{p_1}{p_2}$$

(1-5)

当气体的压力不变时，有

$$\frac{\rho_1}{\rho_2} = \frac{T_2}{T_1}$$

(1-6)

式中 $\rho_1、p_1、T_1$ ——气体状态变化前的密度、绝对压力、热力学温度；
 $\rho_2、p_2、T_2$ ——气体状态变化后的密度、绝对压力、热力学温度。

热力学温度 $T(K)$ 与摄氏温度 t (°C) 的关系是

$$T = 273.15 + t \approx 273 + t$$

【例 1-1】 求在 101.3kPa 下、4℃时，1L 水的质量。

解 101.3kPa 下，4℃时水的密度 $\rho=1000\text{kg/m}^3$ ，水的体积 $V=1\text{L}=0.001\text{m}^3$ ，则水的质量为