



教育部职业教育与成人教育司推荐教材
职业教育电力技术类专业教学用书

工程流体力学

(第二版)

孙丽君 主 编
王海瑛 侯 涛 副主编



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>



教育部职业教育与成人教育司推荐教材
职业教育电力技术类专业教学用书

工程流体力学

(第二版)

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

<http://jc.cepp.com.cn>

内 容 提 要

本书为教育部职业教育与成人教育司推荐教材。

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，并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. —2 版. —北京: 中国电力出版社, 2010.3

教育部职业教育与成人教育司推荐教材

ISBN 978-7-5123-0171-9

I. ①工… II. ①孙… III. ①工程力学: 流体力学-成人教育: 高等教育-教材 IV. ①TB126

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 034102 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://jc.cepp.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

2010 年 5 月第二版 2012 年 9 月北京第十二次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 15.25 印张 301 千字

定价 19.80 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,经研究决定对该教材进行修订、补充和完善。

本教材主要作为高职高专热能与动力装置、火电厂集控运行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教材,还可作为相关专业技术人员的参考书目。

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。

本书的绪论、第三章后四节和第四章由郑州电力高等专科学校孙丽君编写,第一、二章和第三章的前四节由保定电力职业技术学院王海瑛编写,第五、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.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、王海瑛副主编。

全书由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主审。两位审稿老师花费了大量时间精力从不同的侧面提出了很多宝贵的意见,幸福堂老师从篇幅剪裁、内容表述、文字校核方面均做了细致严密的审核,邹文华高工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

2010年3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质量标准。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能动力类、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
第一章 流体及流场的基本性质	4
第一节 流体的概念	4
第二节 流体的物理性质	4
第三节 流体的表面性质	14
第四节 流场 连续性假定	16
思考题	19
习题	20
第二章 流体静力学	22
第一节 作用在流体上的力	22
第二节 静压力的概念和表示方式	24
第三节 流体平衡微分方程 等压面	30
第四节 流体静力学基本方程式	33
第五节 流体静力学基本方程式的应用	37
第六节 流体的相对平衡	48
第七节 静止流体对固体壁面的压力	53
思考题	59
习题	60
第三章 理想流体流动的基本规律	68
第一节 描述流体流动的方法	68
第二节 迹线与流线	71
第三节 系统与控制体	75
第四节 流场的分类	78
第五节 流体流动的连续性方程式——质量守恒定律	81
第六节 流体流动的伯努利方程式——能量守恒定律	83
第七节 流体的动量方程式	96
第八节 流体的动量矩方程式	102
思考题	104
习题	105

第四章 黏性流体的运动规律	109
第一节 流体流动两种状态 层流和紊流.....	109
第二节 圆管内的层流流动规律.....	113
第三节 圆管内的紊流流动规律.....	115
第四节 沿程阻力损失的分析和计算.....	117
第五节 局部阻力损失的分析计算和减少阻力损失的措施.....	121
第六节 管道及管网的水力计算.....	127
第七节 计算机编程在管道计算中的应用.....	136
第八节 水击现象.....	144
思考题.....	146
习题.....	147
第五章 流体平面运动规律	152
第一节 微元流团运动的形式.....	152
第二节 有旋运动 有旋运动的性质.....	154
第三节 平面无旋运动 无旋运动的基本性质.....	158
第四节 边界层的基本概念.....	160
第五节 边界层的分离.....	162
第六节 绕流阻力与升力.....	164
第七节 叶型与叶栅.....	166
第八节 自由淹没射流.....	169
思考题.....	171
习题.....	172
第六章 气体动力学基础	173
第一节 微弱扰动波的传播及声速.....	173
第二节 微弱扰动波在流场中的传播 马赫数.....	175
第三节 可压缩一元定常管流基本方程式.....	178
第四节 参考状态.....	180
第五节 激波.....	182
第六节 渐缩喷嘴和缩放喷嘴的工作原理.....	186
思考题.....	189
习题.....	190
参考文献	191

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、古希腊和古罗马等文明古国的劳动人民,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 年他发明了离心抽水机,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部摩擦定律。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。

到 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。本世纪初,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。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	°C	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	Pa · 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	kg · 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	N · m	SI 导出单位

流体及流场的基本性质

第一节 流体的概念

通常讲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 给出了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 ρ_1, p_1, T_1 ——气体状态变化前的密度、绝对压力、热力学温度；

ρ_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 $t(^\circ\text{C})$ 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

$$m = \rho V = 1000 \times 0.001 = 1(\text{kg})$$

【例 1-2】 某风机厂的产品标明, 通风机的性能曲线是在环境温度为 20°C , 大气压力为 101.3kPa 的条件下实验得到的, 这时空气的密度为 $1.2\text{kg}/\text{m}^3$, 当风机在温度为 40°C , 大气压力为 93.3kPa 的条件下工作时, 风机入口空气的密度是多少?

$$\text{解 } \rho_2 = \rho_1 \frac{p_2 T_1}{p_1 T_2} = 1.2 \times \frac{93.3}{101.3} \times \frac{273 + 20}{273 + 40} = 1.035(\text{kg}/\text{m}^3)$$

二、压缩性和膨胀性

流体的体积随流体所承受的压力大小和温度不同而改变。流体的体积随压力增大而缩小的性质称为**压缩性**。流体的体积随温度升高而增大的性质称为**膨胀性**。液体和气体的这两个性质在变化规律上有很大的不同, 下面分别加以讨论。

(一) 液体的压缩性与膨胀性

1. 液体的压缩性

液体压缩性的大小, 用压缩系数 β 或弹性系数 E_0 来表示。压缩系数表示温度不变时, 单位压力变化所引起的液体体积的相对变化量, 即

$$\beta = -\frac{1}{\Delta p} \frac{\Delta V}{V_1} \quad (1-7)$$

$$\Delta p = p_2 - p_1$$

$$\Delta V = V_2 - V_1$$

式中 β ——液体的压缩系数, m^2/N ;

Δp ——液体压力变化量, 为变化后的压力与变化前的压力的差值, N/m^2 ;

ΔV ——液体体积变化量, 为变化后的体积与变化前的体积的差值, m^3 。

压力增加, 体积减小; 反之, 压力降低, 体积增大, 即 Δp 与 ΔV 的符号相反, 因此, 为了保持 β 为正值, 在公式 (1-7) 中加了一个负号。

压缩系数 β 的倒数就是弹性系数 E_0 , 即

$$E_0 = \frac{1}{\beta} = -\Delta p \frac{V_1}{\Delta V} \quad (1-8)$$

表 1-4 列出了 0°C 的水在不同压力下的压缩系数 β 的值。

表 1-4 0°C 时水的压缩系数 β

$p (\times 10^5 \text{ N}/\text{m}^2)$	4.904	9.807	19.614	39.228	78.456
$\beta (\times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{N})$	0.539	0.537	0.531	0.523	0.515

从表 1-4 中可以看出, 水的压缩系数很小, 约为 $0.5 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{N}$ 。实验显示, 当压力增加时, 液体的压缩性有所减小, 如压力达到 500MPa 时, 水的压缩系数减小到 $\beta = 0.4 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{N}$ 。液体的压缩系数很小, 说明液体不易被压缩; 反过来说, 液体的弹性系数数值却很大, 水的弹性系数 $E_0 = 1/\beta \approx 2.0 \times 10^9 \text{ N}/\text{m}^2$ 。这就是说, 当液体的压力变化很大时, 其体积变化很小, 所以, 在一般情况下, 我们不考虑由于压力变化引起的液体体积的变化。但在特定的情况下, 必须考虑其体积的变化, 如启动前的锅炉水压试验等。

【例 1-3】 已知某锅炉厂生产的 1021/18.2YM 型锅炉从给水泵出口到汽轮机主汽门前的空间水容积是 484m^3 。启动前作水压试验时, 如果压力从 0.2MPa 升高至工作压力

19.6MPa, 不考虑温度变化的影响, 求需要补充多少水?

解 由 $\beta = -\frac{1}{\Delta p} \frac{\Delta V}{V_1}$, 得

$$\Delta V = -\beta \Delta p V_1 = -0.5 \times 10^{-9} \times (19.6 - 0.2) \times 10^6 \times 484 = -4.7(\text{m}^3)$$

可见在压力波动幅度较大时, 由于压力变化引起的体积变化是应该给予足够重视的。

2. 液体的膨胀性

液体膨胀性的大小用膨胀系数 α 来表示。膨胀系数表示压力不变时, 单位温度变化所引起的液体体积的相对变化量, 即

$$\alpha = \frac{1}{\Delta T} \frac{\Delta V}{V_1} \quad (1-9)$$

$$\Delta T = T_2 - T_1$$

$$\Delta V = V_2 - V_1$$

式中 α ——液体的温度膨胀系数, K^{-1} ;

ΔT ——温度变化量, 为液体变化后的温度与变化前的温度之差, K ;

$\frac{\Delta V}{V_1}$ ——液体体积的相对变化量。

同压缩系数一样, 液体的膨胀系数也是很小的, 在工程实际应用中, 除了少数问题外, 在温度变化不是很大时, 可以不考虑液体的膨胀性。从实验得知, 在温度和压力不高时, 液体的膨胀系数较小, 但随着压力和温度的增加, 其值很快变大。它不仅随温度变化, 而且随压力的变化而变化。总的说来, 随着温度和压力的增大, 水的膨胀系数较压缩系数增长要快得多。所以, 高温高压下给水和炉水的密度比常温常压时减少, 而体积增加很多, 这也是必须根据压力和温度, 查出汽水循环系统中不同设备与管道中水密度的原因。就此方面而言, 已有的汽水密度的资料具有极为重要的意义。

虽然水的体积变化量较小, 但由于升温膨胀而引起的对管道、容器等的热应力是很大的。热电厂的汽水循环系统压力温度都很高, 而且采用密闭运行方式, 在机组启、停与负荷变化过程中, 采用控制温度和压力变化速率的方法, 使产生的热应力在安全的范围内。大型电站锅炉在启动前上水时, 一般只允许上到汽包最低可见水位 (汽包正常水位线下 100mm), 因为点火后, 随着炉水温度的升高, 炉水会膨胀到正常水位甚至超过正常水位。

【例 1-4】 如果一容器中水的体积 $V_1 = 40\text{L}$, 保持其压力不变, 温度由 4°C 升高到 90°C , 问水的体积膨胀了多少?

解 从表 1-2 查出, 4°C 时水的密度 $\rho_1 = 1000\text{kg}/\text{m}^3$, 90°C 时水的密度 $\rho_2 = 965.3\text{kg}/\text{m}^3$ 。

水的质量 $m = \rho_1 V_1 = 0.04 \times 1000 = 40\text{kg}$ 。由公式 $\rho = \frac{m}{V}$ 得

$$V_2 = \frac{m}{\rho_2} = \frac{40}{965.3} = 0.0414(\text{m}^3)$$

水的体积变化值 $\Delta V = V_2 - V_1 = 0.0414 - 0.04 = 0.0014(\text{m}^3) = 1.4(\text{L})$

体积相对增加值 $\frac{\Delta V}{V_1} = \frac{1.4}{40} \times 100\% = 3.5\%$

(二) 气体的压缩性与膨胀性

温度和压力的改变,对气体的体积影响很大。由完全气体(气体分子不占体积,分子间无作用力)的状态方程 $p_1 V_1 / T_1 = p_2 V_2 / T_2$ 可知,当温度不变时,体积与压力成反比。压力增加一倍,体积减少为原来的一半。当压力不变时,温度每升高 1°C ,体积就比 0°C 时膨胀 $1/273$ 。因为压力与温度变化时气体的体积要发生较大的变化,所以气体的密度不能视为常数,但是当压力与温度变化很小时,气体的密度仍然可以看作常数。

(三) 可压缩流体和不可压缩流体

由上述可知,流体的压缩性和膨胀性是流体的基本属性,任何流体都是可以压缩的,只是可压缩的程度不同而已。

当压力与温度变化时,体积变化不大,密度可以看作是常数的流体,称为**不可压缩流体**。当压力与温度变化时,体积要发生较大的变化,密度不能视为常数的流体称为**可压缩流体**。

液体的压缩系数和膨胀系数较小,密度可视为常数,通常将其视为不可压缩流体。管路中流动的气体,在一定的条件下,也可以视为不可压缩的。空气和烟风系统在压力低、流速小(流速在 60m/s 以内)的情况下,可以忽略密度变化的影响,而将其视为不可压缩流体来对待。对温度和压力有较大变化的汽水系统、燃烧系统等,从整个系统来说,密度变化较大,但对于各管段而言,则采取在不同段管路中取不同的密度。因此,对每一管段仍可按不可压缩流体对待,所不同的是各管段的密度不同而已。

三、黏性

黏性(亦称黏滞性)是流体的主要物理性质,它是引起运动流体产生能量损失的根本原因。自然界中的流体都具有黏性,由于黏性的存在,使得对流体运动的研究变得十分复杂。

(一) 黏性的定义

在日常生活中,我们观察到水比油流得快;河里流动的水,靠岸边的水流得缓慢,越到中心水流得越快;圆管中流动的水也是这样,处于管壁边缘的水流动缓慢,而管子中心线上的水流动得最快。这些都是因为流体有黏性,致使流层间发生摩擦,流动速度由管轴中心线向管壁逐渐减小。

现在,以流体在两块平板间的流动为例加以说明,如图 1-1 (a) 所示。平板 A 固定不动,平板 B 以速度 u 作等速直线运动。若两平板的尺寸足够大,平板边缘效应可以忽略不计。紧贴两块平板的流体,

由于流体与固体分子的附着力的作用,总是黏附在平板上,流速分别为 0 和 u 。在与流速相垂直的 y 方向上,假定各点的流速分布如图 1-1 (a) 所示。整个流动可以看成是许多不同流速的流层组成,类似一本书,由许多很薄的书页构成一样,但每一层流体与其相邻的一层流体存

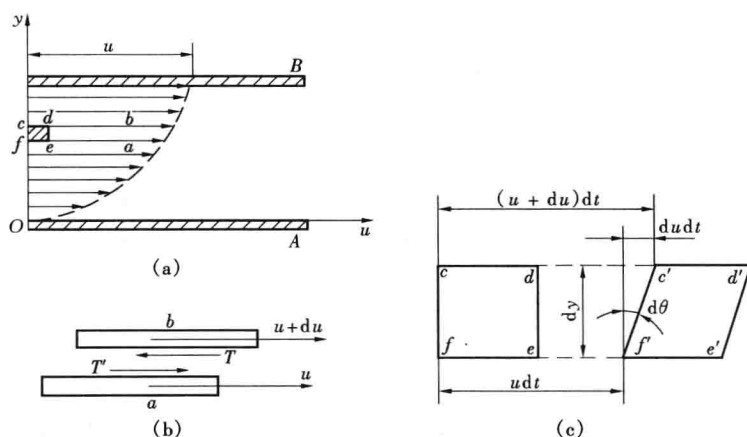


图 1-1 流体的内摩擦

在着相对运动。

在无数的流层中取相距 dy 的相邻两个 a 、 b 流层来看,如图 1-1 (b) 所示。假定两个流层的速度分别为 u 及 $u+du$,即两层流体以速度差 du 作相对滑动。由于流体分子之间的相互吸引而形成的内聚力的作用,速度较快的流层 b 对速度较慢的流层 a 产生一个拖力 T' 。根据作用力与反作用力相等的原理,速度慢的流层 a 对流速快的流层 b 也有一个反作用力 T ,其方向与 T' 相反,是阻碍流层 b 运动的力,因而是阻力。阻力 T 与拖力 T' 是大小相等,方向相反的一对力,分别作用在两层流体上,作用的结果是阻碍或拖动流层间的相对运动,这种情况类似于固体的摩擦。因为它发生在流体的内部,故称为流体的内摩擦。内摩擦中出现的一对力叫做内摩擦力或黏性力。当流体流动时,在流体层与层之间产生内摩擦力的特性,称为流体的黏性。

流体在流动过程中,为了克服内摩擦力,不断将机械能转换成热能而散失,结果造成了流体的能量损失,因此流体的黏性是流体流动时造成能量损失的根本原因。

(二) 牛顿内摩擦定律

通过大量的实验研究,英国科学家牛顿在 1686 年提出了确定流体内摩擦力的大小与影响因素的牛顿内摩擦力定律,用公式表示为

$$T = \eta A \frac{du}{dy} \quad (1-10)$$

式中 T ——流体的内摩擦力, N;

A ——流层间的接触面积, m^2 ;

η ——表征流体种类及温度影响的一个比例常数,称为流体的动力黏度(又称为黏度), $Pa \cdot s$;

$\frac{du}{dy}$ ——流体的速度梯度,表示与流速相垂直的 y 方向上速度的变化率, s^{-1} 。

式 (1-10) 表明:内摩擦力的大小与两流层间的速度变化量 du 成正比,与流层间的距离 dy 成反比,与流层间的接触面积 A 成正比,与流体的种类、温度有关,与流体受到的压力无关。

若以面积 A 除以公式 (1-10) 两端,则

$$\tau = \eta \frac{du}{dy} \quad (1-11)$$

式中 τ ——切应力,即单位面积上的内摩擦力, N/m^2 。

为了理解速度梯度的意义,在图 1-1 (a) 中取出一小方块流体微团 $cdef$ 来看, ef 面上的流速为 u , cd 面上的流速为 $u+du$,如图 1-1 (c) 所示。经过时间 dt 后, $cdef$ 运动到 $c'd'e'f'$ 位置。 ef 面移动的距离为 $u dt$, cd 面移动的距离为 $(u+du) dt$,上下表面移动距离之差为 $du dt$,两表面在 y 方向相距 dy ,在 dt 时间段内,两直角边夹角变化了 $d\theta$ 。

$$d\theta \approx \tan\theta = \frac{du dt}{dy}$$

故

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{du}{dy}$$

由此可知,速度梯度就是角变形速度。速度梯度可由速度分布函数在该点的一阶导数求得。对于平衡流体,由于没有流体质点间的相对运动, $du/dy=0$,故 $\tau=0$ 。所以讨论平衡