

中等专业学校教材

工程流体力学 泵与风机

(第二版)

重庆电力学校 侯文纲编

水利电力出版社

前 言

这本《工程流体力学泵与风机》是根据一九七八年水利电力部召开的中等专业学校热能动力设备专业教学大纲协调会审定的大纲，由重庆电力学校侯文纲、郑德奎，西安电力学校常石明、李大志等同志共同编写的。重庆电力学校侯文纲同志主编，哈尔滨电力学校孙昌人同志主审。参加本书绘图工作的有徐晓云、张春秀、梁兴元等同志；参加本书审阅的还有熊成佑、于新容、韩显文、杜敏、徐晓云、盛志麟、姚健、孙金榜、袁绩泰及王杏珍等同志。

本书是在热能专业一九六一年交流讲义及一九六四年修改稿的基础上重新编写的。在编写过程中，力求注意加强基础理论的阐述，既照顾到课程自身的系统性，也考虑了中专教学的特点。在泵与风机部分还介绍了国内大中型热力发电厂相应的配套设备。考虑到学生的阅读能力，本书尽可能作到语言通俗易懂和概念明确。为了使学生能深入掌握所学的内容，各章还选编了适当的例题、习题和思考题。本书最后一章主要讲解离心泵与风机叶轮水力设计的有关知识，最后还结合电厂泵与风机的改造安排了一个大型作业，对三年制学生，可不安排这部分教学内容。

本教材在编写过程中曾得到各兄弟学校、各有关电厂及武汉、长沙、沈阳、上海、天津等地水泵厂与风机厂的大力协助与支持，在此我们表示衷心的感谢！

限于我们的政治思想及业务水平，加之编写时间仓促，书中难免存在错误和缺点，恳切地希望各兄弟学校师生在使用过程中提出宝贵意见，以便今后进一步修订。

编 者

一九七九年三月

第二版前言

本书是在1980年1月水利电力出版社出版的第一轮教材的基础上,按照水利电力部教育司1980年12月颁布的教学大纲,结合1982年10月在云南昆明召开的本门课程教学研究会讨论的教材修编提纲进行编写的。

本书为中等专业学校电厂热能动力设备专业教学用书。在编写过程中既照顾到课程自身的系统性,也考虑了中专教学的特点,力求加强基础理论和基本概念的阐述,着重培养学生分析和处理问题的能力。工程流体力学将给学生进一步学习专业课奠定必需的理论基础,但不能代替专业课,因此,书中删去了原教材中发电厂管道计算部分,而将有关基础知识并入流动阻力内,合为一章。另外,按照教学大纲的要求,适当地增添了激波的内容,并单独列为一章。泵与风机是一门专业课,它的运行维护及检修等内容应在生产实习中讲授,因此,本书删去了原教材中泵与风机运行维护一章,而将有关的运行理论知识放在离心式泵与风机性能一章内。为了减轻学生的负担,遵照教学大纲的规定,删去了叶轮水力计算一章。这样一来,本书篇幅大大缩减,内容显得更加紧凑,以适应教学的要求。

考虑到学生的阅读能力,本书尽可能作到语言通俗易懂和概念明确。为了使學生能深入掌握所学的内容,各章还编写了适当的思考题、例题及习题。按照规定,本书采用国际单位制,考虑工程实际的需要,对常用到的其它单位制单位也适当作了介绍。

本书由西安电力学校常石明同志主审。另外山东工学院蔡国琰同志和南京工学院马文智同志为我们详细审阅了初稿,提出了许多宝贵的意见。姚天碧同志为本书绘制了大量插图。本教材在编写过程中还得到各兄弟学校、各有关电厂及武汉、长沙、沈阳、上海、天津等地水泵厂及风机厂的大力协助与支持,在此一并表示衷心的感谢!

限于编者的业务水平,书中难免有错误和缺点,恳切地希望各兄弟学校师生在使用过程中提出宝贵意见。

编者

一九八四年五月于重庆

目 录

第二版前言

前言

绪论	1
第一节 学习本课程的目的和任务	1
第二节 流体力学泵与风机的发展概况	1

第一篇 工程流体力学

第一章 流体的基本物理性质 3

第一节 流体的概念	4
第二节 密度和重度	5
第三节 压缩性与膨胀性	7
第四节 粘性	9
第五节 表面张力	13
思考题	14
习题	15

第二章 流体静力学 16

第一节 流体静压力	16
第二节 流体静压力的特性	17
第三节 流体静力学基本方程式	19
第四节 绝对压力、相对压力及真空	22
第五节 等压面及连通器	25
第六节 液柱式测压计	28
第七节 流体静力学基本方程式的意义	32
第八节 液体的相对平衡	35
第九节 作用在平面上的总压力	40
第十节 作用在曲面上的总压力	45
思考题	49
习题	49

第三章 液体动力学 55

第一节 描述液体流动的方法	55
第二节 迹线、流线、微小流束及液流	58
第三节 水力要素、流量、平均流速	60
第四节 稳定流的类型	62
第五节 液流的连续性方程式	65
第六节 液流的能量方程式	67
第七节 液流能量方程式的意义	71
第八节 液流能量方程式的应用	74

第九节 液流的动量方程式	82
思考题	87
习题	88
第四章 流动阻力及管道计算	92
第一节 液体流动的两种状态——层流及紊流	93
第二节 均匀流的基本方程式	96
第三节 圆管中的层流运动	97
第四节 圆管中的紊流运动	100
第五节 紊流运动的沿程阻力损失计算	106
第六节 局部阻力损失计算	112
第七节 总阻力损失的计算及减少流动阻力的措施	117
第八节 两相流动的概念	121
第九节 管道计算	125
第十节 虹吸管	132
第十一节 水击	134
思考题	138
习题	140
第五章 气体动力学基础	144
第一节 音速及M数	144
第二节 气体流动的基本方程式	148
第三节 涡线、涡束及涡强	153
第四节 环量与环流	155
第五节 旋涡定理	158
第六节 流体对叶栅的作用	160
第七节 升力定理	164
第八节 附面层	167
思考题	172
习题	172
第六章 激波	173
第一节 弱扰动在气流中的传播	174
第二节 膨胀波与压缩波	176
第三节 激波的形成	179
第四节 激波前后的参数关系	183
第五节 激波绝热过程及波阻的概念	187
第六节 拉伐尔喷管中的激波	190
思考题	193

第二篇 泵 与 风 机

第七章 离心式泵与风机的分类及构造	194
第一节 离心式泵与风机的分类	194

第二节 离心泵的构造	198
第三节 离心泵的轴向推力及其平衡	206
第四节 离心风机的构造	211
思考题	216
第八章 离心式泵与风机的工作原理	216
第一节 离心式泵与风机的工作过程	216
第二节 速度三角形	218
第三节 叶片式泵与风机的基本方程式	220
第四节 叶片型式	226
第五节 泵与风机的扬程或全压的确定	230
第六节 功率与效率	236
第七节 汽蚀	242
思考题	251
习题	252
第九章 离心式泵与风机的性能	254
第一节 管道特性曲线	255
第二节 离心泵的性能曲线	256
第三节 离心风机的性能曲线	261
第四节 离心式泵与风机的相似定律	264
第五节 比转数	267
第六节 比例定律	273
第七节 离心式泵与风机叶轮的车削	279
第八节 无因次性能曲线	282
第九节 离心式泵与风机工作的稳定性	286
第十节 泵与风机的调节	289
第十一节 离心式泵或风机的联合工作	295
思考题	301
习题	301
第十章 轴流式及其它型式的泵与风机	305
第一节 轴流式泵与风机的工作原理	305
第二节 轴流式泵与风机的基本型式与结构	311
第三节 轴流式泵与风机的性能	320
第四节 其它型式泵	322
第五节 其它型式风机	328
思考题	331
第十一章 发电厂常用泵与风机	331
第一节 发电厂常用泵	331
第二节 发电厂常用风机	343
第三节 泵与风机的发展趋势	347
思考题	349

绪 论

第一节 学习本课程的目的和任务

本课程共分为两篇，第一篇是流体力学，第二篇是泵与风机。流体力学是电厂热能动力设备专业的专业基础课，而泵与风机则是专业课。学习本课程的目的，在于掌握流体力学以及泵与风机的基础理论知识。这些知识作为一个热力工程技术人员是必须具备的。

流体力学是研究流体的平衡与机械运动规律及其在生产实践中应用的一门科学。

流体力学从它所研究的对象来看，可以分为两部分：一部分是液体力学，它所研究的是不可压缩流体——主要是指液体（气体压缩量很小时亦可当作液体对待）的平衡和机械运动规律。因为通常讨论的液体是水，所以一般称为水力学；另一部分是气体动力学，它所研究的是可压缩流体——气体运动的基本规律。由于最常见的气体是空气，因此它又称为空气动力学。

提高流体机械能的机械称为泵与风机。当流体是液体时叫做泵，是气体时就叫做风机。泵与风机的理论是建立在流体力学的基础上的，所以又称为流体机械。泵与风机部分主要研究它们的构造、工作原理、性能以及发电厂常用泵与风机等有关知识。

现代热力发电厂是依靠流体介质的循环来实现热功转换的（例如蒸汽、水、油等循环系统）。电厂中煤粉的输送、烟气的排出、燃烧所需空气的供给，都和流体的运动紧密相连。要正确地分析与流体的机械运动有关的各种问题，例如，确定流体中某一点的静压力或作用面上的总压力，进行管道的阻力计算，了解拉伐尔喷管中的激波等问题，就必须具备流体力学的基本知识。此外，在锅炉、汽轮机、热工测量等专业课程中也广泛地应用到流体力学的有关知识。目前可以说，工程技术的各个部门都与流体有着密切的联系。因此，流体力学实际上已成为各部门的一门重要的技术基础课程。

泵与风机是国民经济各个生产部门都广泛应用的通用机械。在热力发电厂中，它们像人的心脏一样，维持着电厂中各种介质的循环，在电力生产过程中起着重要的作用。泵与风机的工作正常与否直接影响到发电厂的安全与经济运行，所以它们被认为是发电厂最重要的辅助设备之一，掌握它们的有关知识是非常必要的。

第二节 流体力学泵与风机的发展概况

流体力学泵与风机和其它科学一样，也是在人类社会生产实践中产生和发展起来的，并且今后还将随着生产的发展日臻完善。

还在古代的时候，人类为了生存，在向洪水与干旱作斗争的实践中，就已经积累了不少水力学方面的知识。如我国在公元前两千多年前就有大禹治水的传说，到春秋战国和秦朝时，修建了都江堰、郑国渠和灵渠三大著名水利工程，隋朝时开凿了闻名中外的大运

河，全长1782公里，对沟通南北交通发挥了很大的作用。作为水力学的萌芽，是古希腊学者阿基米德在公元前250年写的《论浮体》一文。

到了欧洲文艺复兴时期（15~17世纪），由于资本主义的兴起，流体力学得到很快的发展。在这一时期的一些学者，如达·芬奇、伽里略、巴斯加、牛顿等在流体力学方面都有较大的贡献。但是，他们的研究都是个别的，孤立的，还不足以使当时流体力学成为一门完整的科学。虽然如此，他们的研究成果却奠定了这门科学进一步发展的基础。

在十八世纪，欧洲资本主义蓬勃发展，特别是产业革命更加促进了自然科学的发展。这一时期流体力学分成了两个发展方向：一个方向是放弃影响实际流体运动的次要因素，只考虑主要的因素，将其理想化，并应用严格的数学分析作为工具建立了古典理论流体力学。在这方面的学者，如欧拉、伯努里、拉格朗日等都有杰出的成就。但是，由于理论流体力学忽略了实际现象中的各种复杂因素，因而所得结论与实际情况总是不完全相符合的。于是人们又进行了大量的试验和观察。一些学者和工程师们，根据从实践中总结出来的规律，建立了流体力学的另一个发展方向——实用水力学。实用水力学几乎完全是一种试验性的科学。它提出了许多经验公式及试验系数，用来解决生产实践中提出的各种问题。在很长一段时间里，理论流体力学与实用水力学各自走着完全不同的发展道路。实用水力学忽视理论而无力概括与分析大量试验获得的数据；理论流体力学又不重视实际，因而不可能说明工程实际中所出现的各种复杂现象。直到十九世纪后期，特别是本世纪以来，随着航空、化工及石油工业的飞速发展，使流体力学进入了一个新的时期。理论流体力学与实用水力学相互结合，使工程流体力学发展成为一门完善的应用科学。

随着科学技术的不断进步，尤其是本世纪六十年代以来，电子计算机的出现与不断更新，使得过去无法计算的许多问题得以很快的解决。同时迅速发展的不同学科之间的相互渗透，以及火箭、宇宙飞行、磁流体等一系列新技术又对工程流体力学提出了许多新的课题，派生出许多新的领域和学科，使得工程流体力学朝着更新的阶段向前迈进。

在古代，为了生产和生活的需要，人类逐步学会了挖井取水，创造了戽斗、吊杆、辘轳等取水工具，随着农业的发展，需要用水来灌溉田地，于是产生了结构较复杂、效率较高的取水机械，如水车、木制往复式水泵等。由于冶金事业的出现，开始应用了风箱，随后又出现了风车等。十八世纪至十九世纪中叶，因为蒸汽机的发明和采矿、钢铁工业的发展，出现了比较完善的蒸汽作用的往复式水泵与风机。也就在这一时期欧拉提出了离心式泵与风机的基本方程式，随着出现了离心泵。但是，这些泵由于缺乏高速转动的原动机，始终没有得到广泛的应用。到了十九世纪末，由于高速原动机的出现，以及流体力学、材料力学、机械制造工艺方面的迅速发展，为离心式泵与风机的应用提供了良好的条件。因此，在二十世纪初离心式泵与风机取得了巨大的发展，并广泛地应用到国民经济的各个部门。

随着我国电力系统容量的逐步增大，热力发电厂中广泛地采用了大容量、高参数的锅炉和汽轮机等设备，这就促进了泵与风机向着大流量、高扬程、高效率、高转数及自动化的方向发展。但是无论在理论上还是材料和制造工艺方面都还有许多问题没有完全解决，有待今后进一步研究和改善。

第一篇 工程流体力学

第一章 流体的基本物理性质

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,但更主要的因素却是内部的。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,忽略一些次要的因素,先建立研究的模型,然后再把应该考虑的次要因素,逐步引入修正,直到获得满意的结果为止。流体力学正是遵循这样一种普遍的研究方法来解决每一个具体问题,得到不断发展的。

流体力学在计算中往往会遇到各种单位,本书采用国际单位制(SI)。考虑到我国目前正在从工程单位制向国际单位制过渡,为避免混淆,特把与本课程有关的两种单位制的主要换算关系列入表1-1,供使用时参考。

表 1-1 国际单位制与工程单位制换算对照表

物理量	国际单位制(SI)		工程单位制		换算关系	备 注
	名 称	代 号	名 称	代 号		
长 度	米	m	米	m		SI的基本单位
质 量	千克(公斤)	kg	工程质量单位	kgf·s ² /m	1kgf·s ² /m = 9.807kg	SI的基本单位, 工程单位制的导出单位
时 间	秒	s	秒	s		SI的基本单位
力	牛顿	N	公斤力	kgf	1kgf = 9.807N	工程单位制的基本单位
压 力	帕斯卡	Pa($\frac{N}{m^2}$)	公斤力 每平方米	kgf/cm ²	1kgf/cm ² = 9.807 × 10 ⁴ Pa	压力还常用到巴(bar)及标准大气压(atm), 其换算关系为: 1bar = 10 ⁵ Pa, 1atm = 101325Pa
密 度	千克 每立方米	kg/m ³	工程质量单位 每立方米	kgf·s ² /m ³	1kgf·s ² /m ³ = 9.807kg/m ³	
重 度	牛每立方米	N/m ³	公斤力 每立方米	kgf/m ³	1kgf/m ³ = 9.807N/m ³	
粘 度	帕秒	Pa·s	公斤力秒 每平方米	kgf·s/m ²	1kgf·s/m ² = 9.807Pa·s	
运动粘度	平方米每秒	m ² /s	平方米每秒	m ² /s		运动粘度的单位还常碰到斯(st)、厘施(cst), 其换算关系为: 1st = 100cst = 10 ⁻⁴ m ² /s
能、 功	焦耳	J(N·m)	公斤力米	kgf·m	1kgf·m = 9.807J	
功 率	瓦	W($\frac{J}{s}$)	公斤力米 每秒	kgf·m/s	1kgf·m/s = 9.807W	

第一节 流体的概念

一、流体

从已经学过的力学知识中,大家知道,所谓刚体在外力作用下是不变形的。它是理论力学所讨论的对象。材料力学所研究的对象——弹性体——是遵循虎克定律,应力和应变成正比的物体。它们都是固体。而流体力学研究的是流体。**流体是气体和液体的统称。**固体与流体比较起来分子之间的距离要近得多,分子间的吸引力也大得多。因而固体能够抵抗外力而保持本身一定的形状。流体由于分子之间的吸引力小,而没有固定的形状。流体在任何微小的切向力的作用下都要产生连续不断的变形。这种无限制的变形就是流动。流体不能抵抗剪切变形,而只能抵抗变形速度,即对变形速度呈现一定的阻力。**流体具有的极易变形的这个特性叫做流动性。**因为气体和液体都具有流动性,故都称为流体。

粘性很大的流体常常容易与塑性体混淆。但是流体与塑性体完全不同。不管粘性多大的流体,在微小切向力作用下,总要产生极小的变形。而塑性体只有切向力达到一定数值后才会产生变形。这是它们的根本区别。

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,而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,虽然分子之间能够作相对移动,但已不能作自由运动了。因而液体有固定的体积,能够承受巨大的压力,很不容易被压缩,并且和气体有明显的分界面——自由表面。

二、连续性的假定

从微观上来看,流体是由大量分子组成的,分子之间总有一定的间隙,事实上流体是不连续的。以海平面上的空气为例,在温度为 15°C ,大气压力为 101308Pa (760mmHg)时, 1cm^3 的体积内含有的分子数为 2.7×10^{19} 个。可见体积甚小,而分子数众多,分子之间的间隙实际上是微不足道的。如果不去研究微观的无数分子的瞬时状态,而着眼于宏观的无数分子作用的总合,就可以**不考虑分子之间的间隙,把流体视为无数连续分布的流体质点组成的连续介质。**这就是流体连续性的假定。

有了连续性的假定,就可以使流体力学摆脱研究分子运动的复杂性,只考虑外力作用下的宏观机械运动。同时因为流体是连续的,表征流体特性的各个物理量,如温度、密度、流速、压力和切应力等,在一般情况下也是连续的。这样就可以利用连续函数这一有力的数学工具,分析和研究流体各个物理量的变化规律。

应该指出,连续介质的假定也有一定的应用范围。当研究的区域很小,与分子的自由行程处于同一数量级时,譬如在很稀薄的空气中,或高真空技术中,连续介质的假定就不再适用了,而必须考虑为不连续介质了。另外,当流体性质有了局部突变时,连续介质的假定也不再适用。例如液流中局部地区的压力很低,发生汽化现象形成气穴时,就会破坏液体的连续流动。

第二节 密度和重度

一、密度

按照牛顿定律，流体总是力图保持它的运动状态不变，这个性质就是所谓惯性。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。

流体单位体积内所具有的质量称为密度，用希腊字母 ρ 表示，即

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

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 。

二、重度

根据万有引力定律，任何物体之间都有吸引力。地球对物体的吸引力叫做重力，又称重量。为了比较不同流体重量的大小，一般用重度来表示。

流体单位体积的重量称为重度，用希腊字母 γ 表示，即

$$\gamma = \frac{G}{V} \quad (1-2)$$

式中 γ ——流体的重度， N/m^3 ；

G ——流体的重量， N ；

V ——流体的体积， m^3 。

流体的密度与重度的关系，可由下式导出：

$$G = m \cdot g$$

上式两边同除以流体的体积 V ，则得：

$$\gamma = \rho g \quad (1-3)$$

式中 g ——重力加速度， $g = 9.807 \text{m/s}^2$ 。

当流体是由若干种彼此不起化学作用，而且能够均匀混合的流体组成时，此混合流体的重度，可按混合的百分比计算：

$$\gamma = 0.01(\gamma_1 \alpha_1 + \gamma_2 \alpha_2 + \gamma_3 \alpha_3 + \cdots + \gamma_n \alpha_n) \quad (1-4)$$

式中 $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3, \cdots, \gamma_n$ ——混合流体各成分的重度， N/m^3 ；

$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \cdots, \alpha_n$ ——混合流体各成分的百分数， $\%$ 。

表1-2列举了一些工程上常见的流体在标准大气压力下的密度和重度。

三、影响流体密度与重度的因素

流体的密度与重度主要随流体的种类而异。从表1-2可以看出液体的密度与重度远远大于气体，当两者相比较时，气体重度常常可以忽略不计。

表 1-2

常见流体的密度与重度

名 称	温 度 (°C)	密 度 (kg/m³)	重 度 (N/m³)	名 称	温 度 (°C)	密 度 (kg/m³)	重 度 (N/m³)
汽 油	15~20	700~750	6860~7350	氨	0	0.771	7.56
苯	60	873	8650	氮	0	1.251	12.28
甘 油	0	1260	12360	空 气	0	1.293	12.68
煤 油	15	769	7450	氧	0	1.429	14.02
蒸馏水	4	1000	9807	氯	0	3.217	31.55
重 油	15	900~950	8930~9320	氢	0	0.0899	0.881
酒 精	15~18	790	7750	甲 烷	0	0.717	7.03
水 银	0	13600	133400	一氧化碳	0	1.250	12.27
海 水	15	1020~1030	10000~10100	二氧化碳	0	1.976	19.40
乙 醚	0	740	7260	乙 烯	0	1.206	11.83
甲 醇	4	810	7940	二氧化硫	0	2.925	28.69

对于同一种流体而言,其密度与重度随温度与压力的变化而变化。这是因为温度不同时,流体的体积要发生变化的缘故。表1-3中列出了水在标准大气压力下不同温度时的重度。对液体来讲,这种变化不大,在通常的情况下可以近似地认为液体的密度与重度是常数。对气体来讲,温度与压力的影响很大,不能不加以考虑。气体的密度和重度随温度与压力的变化关系,可用完全气体的状态方程式来表示,即

$$\rho_2 = \rho_1 \frac{p_2}{p_1} \frac{T_1}{T_2} \quad (1-5)$$

及

$$\gamma_2 = \gamma_1 \frac{p_2}{p_1} \frac{T_1}{T_2} \quad (1-6)$$

式中 ρ_1 、 γ_1 、 p_1 、 T_1 ——气体状态变化前的密度、重度、压力及绝对温度,
 ρ_2 、 γ_2 、 p_2 、 T_2 ——气体状态变化后的密度、重度、压力及绝对温度。

表 1-3

水 在 不 同 温 度 下 的 重 度

温 度 (°C)	0	4	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
重 度 (N/m³)	9804	9807	9803	9789	9761	9730	9690	9642	9589	9530	9466	9398

还应该指出,密度是绝对的,它取决于流体的质量,而与流体所处的位置无关。重度则是相对的,它依赖于重力加速度 g 值,随流体所处的位置,主要是纬度与海拔高度而定。表1-2及表1-3中流体重度的数值是按 $g = 9.807\text{m/s}^2$ 计算的。

例题1-1 在一个标准大气压力下,0°C的空气与水银的密度分别为1.293kg/m³及13600 kg/m³。4°C纯净的水重度为9807N/m³。试分别求空气、水银及水的重度与密度为若干?

解 根据公式(1-3)求得:

空气的重度 $\gamma = \rho g = 1.293 \times 9.807 = 12.68\text{N/m}^3$

水银的重度 $\gamma = \rho g = 13600 \times 9.807 \approx 133400\text{N/m}^3$

$$\text{水的密度} \quad \rho = \frac{\gamma}{g} = \frac{9807}{9.807} = 1000 \text{kg/m}^3$$

这几个常用流体的数据应该熟记。

例题1-2 求烟气在锅炉炉膛内温度达800℃时的密度与重度。已知烟气在0℃及压力为101308Pa时的密度为1.3kg/m³。炉膛内压力的变化不计。

解 根据公式(1-5)，当压力不变时，烟气密度与温度的关系为：

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

800℃时烟气的密度为：

$$\rho_2 = 1.3 \times \frac{273}{273 + 800} = 0.331 \text{kg/m}^3$$

800℃时烟气的重度为：

$$\gamma = \rho g = 0.331 \times 9.807 = 3.246 \text{N/m}^3$$

第三节 压缩性与膨胀性

流体的体积随流体所承受的压力和温度而改变。流体所承受的压力增大时，流体体积缩小的性质称为压缩性。流体温度升高时，流体体积增大的性质称为膨胀性。液体与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

液体压缩性的大小，用压缩系数 κ 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相对变化量，即

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

式中 κ ——液体的压缩系数， m^2/N ；

Δp ——液体压力的变化量，等于变化后的压力 p_2 与变化前的压力 p_1 的差值，即

$$\Delta p = p_2 - p_1, \text{N/m}^2;$$

ΔV ——液体体积的变化量，等于变化后的体积 V_2 与变化前的体积 V_1 之差，即

$$\Delta V = V_2 - V_1, \text{m}^3;$$

V_1 ——液体原来的体积， m^3 。

由于压力增加，体积减小；反之，压力降低，体积加大。 Δp 与 ΔV 符号相反，为了保持 κ 为正值，在公式(1-7)中加了一个负号。

压缩系数 κ 的倒数就是弹性系数 E_0 ，即

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

式中 E_0 ——液体的弹性系数， N/m^2 。

表1-4列出了0℃的水在不同压力下的压缩系数 κ 值。

从表1-4中可见，0℃的水在 $4.904 \times 10^5 \sim 78.456 \times 10^5 \text{Pa}$ 压力下，压力每增加9807

表 1-4

0°C时水的压缩系数 κ 值

压力 $\times 10^{-5}(\text{N/m}^2)$	4.904	9.807	19.614	39.228	78.456
压缩系数 $\kappa \times 10^9(\text{m}^2/\text{N})$	0.539	0.537	0.531	0.523	0.515

N/m^2 (1 工程大气压), 体积的相对减少量约为万分之五左右, 变化量是很小的。与水类似, 其它液体的压缩系数也是很小的。工程实际计算中, 常常忽略压力变化时体积的改变, 而把液体的密度视为常数。这种液体称为**不可压缩流体**。但是, 在研究液体流动的某些特殊问题 (如水击) 时, 由于瞬时的压力升高很大, 体积有了明显的变化, 这时就必须考虑液体的压缩性, 否则将造成很大的误差, 以致不能得到正确的结论。

二、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相对变化量, 即

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

式中 α ——液体的温度膨胀系数, K^{-1} ;

ΔT ——温度的变化量, 等于液体变化后的温度 T_2 与变化前的温度 T_1 之差, 即

$$\Delta T = T_2 - T_1, \text{ K};$$

$\frac{\Delta V}{V}$ ——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, 除了少数问题外, 工程实用上在温度变化不是很大时, 可以不考虑液体的膨胀性。

三、气体的压缩性与膨胀性

温度与压力的改变, 对气体的体积影响很大。由完全气体的状态方程式可知, 当温度不变时, 气体体积与压力成反比。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 $1/273$ 。因为压力及温度变化时气体的体积要发生较大的变化, 气体的密度和重度都不能视为常数, 所以气体称为**可压缩流体**。

气体虽然是可以压缩与膨胀的, 但是压力与温度变化很小时, 气体的密度与重度仍然可以看作常数。这种气体仍旧属于不可压缩流体。常温下流速不高 (小于 50m/s) 或压力变化不大 (小于 9807Pa) 的气体, 都可以视为不可压缩流体。一切适用于不可压缩流体的规律都可以应用在这种气体上。

例题 1-3 鉴定压力表用的校正器如图 1-1 所示。校正器内充满了油液, 其体积压缩系数 $\kappa = 0.484 \times 10^{-9} \text{m}^2/\text{N}$ 。由拧入油缸内密封良好的活塞来造成所需要的压力。活塞直径 $d = 1\text{cm}$, 若螺距 $t = 2\text{mm}$, 在 101.3kPa (一个标准大气压) 之下, 校正器内的体积 $V = 200\text{cm}^3$ 。试问为了增加 20.26MPa (200 个标准大气压) 的压力, 手轮需要摇的转数是若干?

解 根据公式 (1-8) 可以求出油液需要减少的体积为:

$$\Delta V = -KV \Delta p$$

手轮转动 n 圈油缸所减少的体积为:

$$\Delta V = -\frac{\pi}{4} d^2 t n$$

故所求转数 n 为:

$$n = \frac{4KV \Delta p}{\pi d^2 t} = \frac{4 \times 0.484 \times 10^{-9}}{3.14} \times \frac{10^4}{1^2} \times \frac{200}{10^6} \times \frac{20.26 \times 10^6}{0.002} = 12.5 \text{ 转}$$

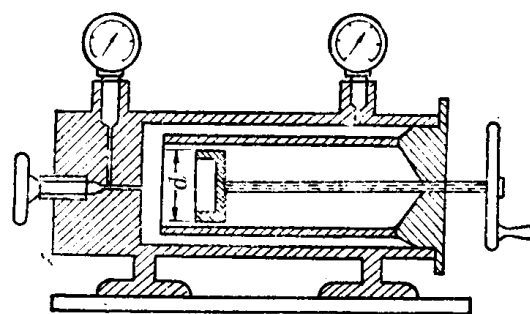


图 1-1 压力表校正器

第四节 粘 性

一、流体的内摩擦

观察不同流体的流动就会发现，水比油的流动要畅快一些，而热沥青、稀浆糊等流体的流动就更加阻滞。粘性反映了流体运动的这一特性，它是流体的一个重要的物理性质，对流体的运动会产生极大的影响。

现在以流体在两块平板间的流动为例加以说明，如图1-2a)所示。平板A固定不动，B平板以速度 U 作等速直线运动。若两平板的尺寸足够大，平板边缘的情况可以忽略不计。紧贴两块平板的流体，由于流体与固体分子间的附着力的作用，总是粘附在平板上，流速分别为零与 U 。在与流速相垂直的 y 方向上，假定各点的流速分布如图1-2a)所示(当水平的平板之间流体没有压力差的作用而流动时，流速的分布是线性的)。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。不过，每一层流体与其相邻的一层流体存在着相对运动。

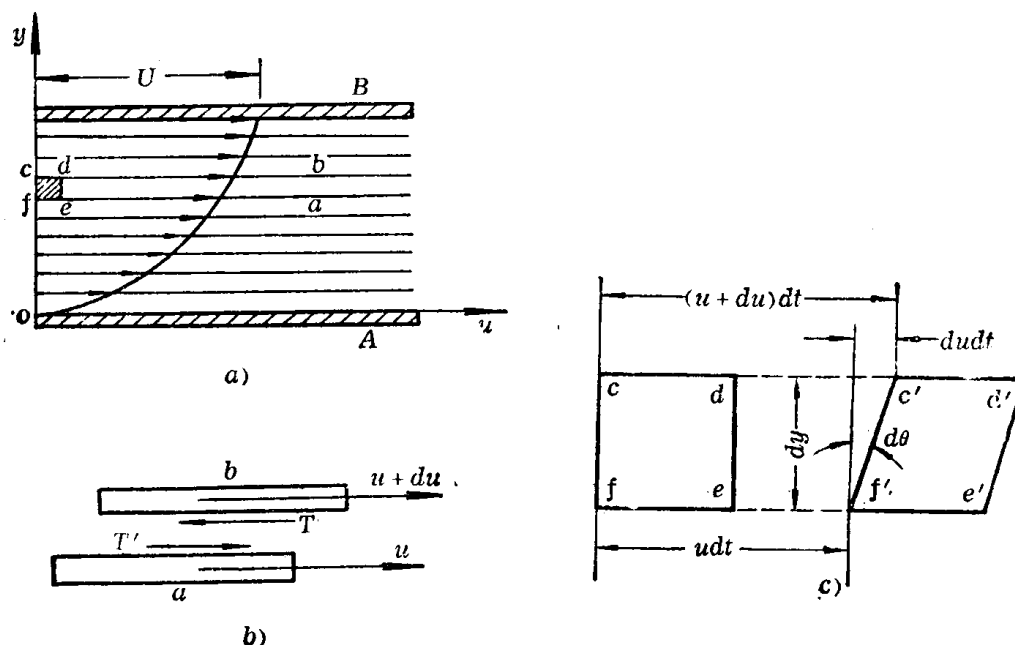


图 1-2 流体的内摩擦

在无数的流层中取相距 dy 的相邻两个 a 、 b 流层来看,如图1-2b)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' 。根据作用与反作用相等的原理,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,作用的结果都是阻碍流体层间的相对运动。这种情况类似于固体的内摩擦,又发生在流体的内部,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粘性力。流体运动时,在流体层间产生内摩擦的特性称为流体的粘性。作相对运动的流体必须克服粘性的阻碍,因而造成能量的消耗。粘性是引起流体运动能量损失的根本原因。

二、内摩擦定律

由牛顿提出并经试验证明,相邻两层流体间内摩擦力 T 的大小与两层流体的接触面积 A 及速度差 du 成正比,与两层流体间的距离 dy 成反比,并与流体种类及温度有关,而与流体所承受的压力无关。用数学式表达为:

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

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,称为流体的动力粘度(又称为动力粘滞系数或绝对粘度等), $Pa \cdot s$;

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

公式(1-10)称为牛顿内摩擦定律。实践表明,这个定律对于气体及大多数液体都是正确的。

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1-2a)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 $u+du$ (图1-2, c)。经过时间 dt 后, $cdef$ 运动到 $c'd'e'f'$ 位置。 ef 面移动的距离为 udt , cd 面移动的距离为 $(u+du)dt$,上下表面相差的移动距离为 $dudt$ 。两表面在 y 方向相距 dy 。两直角边夹角的变化 $d\theta$,即角变形(剪切变形)为:

$$d\theta \approx \tan \theta = \frac{dudt}{dy}$$

$$\text{角变形速度} \quad \frac{d\theta}{dt} = \frac{du}{dy}$$

由此可知,速度梯度代表了角变形速度的大小。它的数值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 $\frac{du}{dy} = 0$,故 $\tau = 0$ 。所

以，讨论平衡的流体不必考虑粘性。

三、流体的动力粘度及运动粘度

流体动力粘度的物理意义及单位可由 (1-11) 式得到：

$$\eta = \frac{\tau}{\frac{du}{dy}} \quad (1-12)$$

当 $\frac{du}{dy} = 1$ 时， $\eta = \tau$ 。即，流体速度梯度为1单位时，流体相互接触面上的切应力等于动力粘度的数值。 η 值大，表明内摩擦力的作用强，粘性对流动的影响大。

实验室动力粘度一般常用 P(泊) 作单位，它与国际单位的换算关系是 $1P = 0.1Pa \cdot s$ 。

在流体力学中将流体动力粘度 η 与密度 ρ 的比值称为运动粘度，并用希腊字母 ν 表示，即

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} \quad (1-13)$$

式中 ν ——流体的运动粘度，又叫运动粘滞系数， m^2/s 。

运动粘度 ν 没有动力学中力的单位 “N”，只含有运动学中的单位 “m” 及 “s”，故称为运动粘度。

流体的粘度不仅随流体种类而不同，而且随流体的温度而变化。液体和气体的粘度随温度变化的规律是不相同的。温度升高时，液体的粘度减少；而气体的粘度则加大。表1-5 列出了水和空气在标准大气压力下的 η 值及 ν 值。

表 1-5 水和空气的 η 值和 ν 值

温 度 (°C)	水		空 气		温 度 (°C)	水		空 气	
	η $\times 10^6$ (Pa·s)	ν $\times 10^6$ (m ² /s)	η $\times 10^6$ (Pa·s)	ν $\times 10^6$ (m ² /s)		η $\times 10^6$ (Pa·s)	ν $\times 10^6$ (m ² /s)	η $\times 10^6$ (Pa·s)	ν $\times 10^6$ (m ² /s)
-50			14.61	9.54	40	653	0.659	19.42	17.60
-20			16.28	11.93	50	549	0.556	19.61	18.60
0	1788	1.792	17.16	13.70	60	470	0.478	20.10	19.60
5	1518	1.519	17.46	14.20	70	406	0.415	20.40	20.45
10	1305	1.306	17.75	14.70	80	355	0.365	20.99	21.70
15	1139	1.139	18.00	15.20	90	315	0.326	21.58	22.90
20	1004	1.006	18.24	15.70	100	282	0.295	21.77	23.78
25	890	0.893	18.49	16.16	200			25.89	35.82
30	801	0.805	18.73	16.61	300			29.72	49.90

温度对液体和气体粘度的影响之所以不同，是因为引起粘性的主要因素不一样所致。液体的粘性主要是由分子间的吸引力造成的。当温度升高时，分子间的吸引力减小，使流体的粘度降低。而气体的粘性主要是由气体内部的运动质点的动量交换而产生的。温度增加，分子的碰撞增多，不同流层的质点动量交换加剧，从而导致了粘度升高。

液体粘度随温度升高而降低的特性，对锅炉燃油的输送和雾化质量的提高，起了积极