



普通高等教育“十三五”规划教材

PUTONG GAODENG JIAOYU “13·5” GUIHUA JIAOCAI

工程流体力学

Engineering Fluid Mechanics

李良 周雄 主编



冶金工业出版社
www.cnmp.com.cn



工程流体力学

李良 周雄 主编

北京

冶金工业出版社

2016

内 容 提 要

本书共分 10 章,在系统讲述了流体静力学、运动学和动力学的基础知识之后,介绍了流体的阻力与水头损失、有压管路 with 孔口和管嘴出流、明渠均匀流与堰流、气体的一元流动、量纲分析与相似理论、计算流体力学等内容。

本书可作为高等院校机械、热动力、建筑环境、石油类专业及其相近专业流体力学课程的教材,也可供工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

工程流体力学/李良,周雄主编. —北京:冶金工业出版社,2016.8

普通高等教育“十三五”规划教材

ISBN 978-7-5024-7294-8

I. ①工… II. ①李… ②周… III. ①工程力学—流体力学—高等学校—教材 IV. ①TB126

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 192285 号

出 版 人 谭学余

地 址 北京市东城区嵩祝院北巷 39 号 邮编 100009 电话 (010)64027926

网 址 www.cnmp.com.cn 电子信箱 yjchs@cnmp.com.cn

责任编辑 陈慰萍 美术编辑 吕欣童 版式设计 吕欣童

责任校对 李 娜 责任印制 李玉山

ISBN 978-7-5024-7294-8

冶金工业出版社出版发行;各地新华书店经销;固安华明印业有限公司印刷

2016 年 8 月第 1 版,2016 年 8 月第 1 次印刷

787mm × 1092mm 1/16; 12.5 印张; 301 千字; 189 页

30.00 元

冶金工业出版社 投稿电话 (010)64027932 投稿信箱 tougao@cnmp.com.cn

冶金工业出版社营销中心 电话 (010)64044283 传真 (010)64027893

冶金书店 地址 北京市东四西大街 46 号(100010) 电话 (010)65289081(兼传真)

冶金工业出版社天猫旗舰店 yjgycbs.tmall.com

(本书如有印装质量问题,本社营销中心负责退换)

前 言

“工程流体力学”是高等院校多种工科专业必修的一门专业基础课程。本书根据教育部对应用型人才培养的新要求,依据机械类、能源动力类、建筑环境类、石油类相关专业的本科人才培养方案,结合编者多年的教学经验与实践体会,参考有关文献编写而成。

本书在编写过程中,注重基础知识讲解的同时,更强调学以致用,突出实践能力的培养,提高学生解决实际问题的能力。为了便于学生更好地阅读及自学,各章后均有一定数量的思考题和习题。

本书共分10章,内容涉及流体静力学、运动学和动力学。本书适用于40~64学时的本科工程流体力学课程教学。书中各章节之间既相互联系,又相对独立,任课教师在教学实践中,可根据不同专业要求,有针对性地对教材的部分内容进行取舍。

重庆科技学院李良、周雄为本书主编。本书由重庆科技学院机械电子工程系教师合作编写,并得到了加拿大滑铁卢大学 Fue-Sang Lien 教授的帮助。书中第1、8章由周雄编写;第4、6、9章由李良编写;第2、5章由邓晓刚编写;第3章由杨永刚编写;第7章由周小鹏编写;第10章由加拿大滑铁卢大学 Fue-Sang Lien 教授和孟航编写。全书由李良统稿,由周雄审定。

加拿大滑铁卢大学 Fue-Sang Lien 教授对本书提出了许多宝贵意见,在此表示感谢!

由于编者水平所限,书中不足之处,恳请读者批评、指正。

编 者

2016年5月

冶金工业出版社部分图书推荐

书 名	作 者	定价(元)
冶金通用机械与冶炼设备(第2版)(高职高专教材)	王庆春	56.00
矿山提升与运输(第2版)(高职高专教材)	陈国山	39.00
洁净煤技术(高职高专教材)	李桂芬	30.00
煤矿安全监测监控技术实训指导(高职高专教材)	姚向荣	22.00
高职院校学生职业安全教育(高职高专教材)	邹红艳	22.00
冶金企业安全生产与环境保护(高职高专教材)	贾继华	29.00
锌的湿法冶金(高职高专教材)	胡小龙	24.00
液压气动技术与实践(高职高专教材)	胡运林	39.00
数控技术与应用(高职高专教材)	胡运林	32.00
烧结球团生产操作与控制(高职高专教材)	侯向东	35.00
冶金工业分析(高职高专教材)	刘敏丽	39.00
工程材料及热处理(高职高专教材)	孙 刚	29.00
现代转炉炼钢设备(高职高专教材)	季德静	39.00
环境监测与分析(高职高专教材)	黄兰粉	32.00
电子技术及应用(高职高专教材)	龙关锦	34.00
自动化仪表使用与维护(高职高专教材)	吕增芳	28.00
冶金机械设备故障诊断与维修(高职高专教材)	蒋立刚	55.00
机械基础与训练(上)(高职高专教材)	黄 伟	40.00
机械基础与训练(下)(高职高专教材)	谷敬宇	32.00
心理健康教育(中职教材)	郭兴民	22.00
控制工程基础(高等学校教材)	王晓梅	24.00
起重与运输机械(高等学校教材)	纪 宏	35.00
机械优化设计方法(第4版)(本科教材)	陈立周	42.00
固体废物处置与处理(本科教材)	王 黎	34.00
环境工程学(本科教材)	罗 琳	39.00
城市轨道交通车辆检修工艺与设备(本科教材)	卢 宁	20.00

目 录

1 绪论	1
1.1 流体力学的发展概况、研究对象和研究方法	1
1.1.1 流体力学的发展概况	1
1.1.2 流体力学的研究任务与对象	2
1.1.3 流体力学的研究方法	2
1.2 流体质点与连续介质假设	3
1.2.1 流体质点的概念	3
1.2.2 连续介质假设	4
1.3 流体的主要物理性质	4
1.3.1 流体的密度、比体积和相对密度	4
1.3.2 流体的压缩性和膨胀性	5
1.3.3 液体的表面张力	7
1.3.4 汽化压强	7
1.4 流体的黏性	7
1.4.1 牛顿黏性实验	8
1.4.2 牛顿内摩擦定律	8
1.4.3 黏度的表示	9
1.4.4 压力、温度对黏度的影响	10
1.4.5 流体的分类	10
思考题	11
习题	11
2 流体静力学	13
2.1 静止流体的作用力	13
2.1.1 质量力	13
2.1.2 表面力	13
2.1.3 流体静压强的特性	14
2.2 流体的平衡微分方程	15
2.2.1 欧拉平衡方程	15
2.2.2 压强分布函数	17
2.2.3 质量力的势函数	17
2.2.4 等压面	17

2.3 重力场中的静压分布及压强测定	18
2.3.1 重力场中的静压强	18
2.3.2 静力学基本方程的意义	18
2.3.3 静压强分布及压强表示	19
2.3.4 静压强的测量	21
2.4 流体的相对平衡	23
2.4.1 等加速水平运动容器中流体的相对平衡	23
2.4.2 等角速旋转容器中液体的相对平衡	24
2.5 静止流体对固体壁面的作用力	25
2.5.1 平面壁上的作用力	25
2.5.2 静止流体作用在曲面上的总压力及压力体	27
思考题	30
习题	31
3 流体运动学	34
3.1 研究流体运动的两种方法	34
3.1.1 拉格朗日法	34
3.1.2 欧拉法	34
3.2 欧拉法的基本概念	35
3.2.1 流场分类	35
3.2.2 稳定流动和不稳定流动	35
3.2.3 迹线与流线	36
3.2.4 流管、流束、总流	37
3.2.5 有效断面、流量和断面平均流速	37
3.2.6 系统与控制体	38
3.3 连续性方程	39
3.3.1 三维连续性微分方程	39
3.3.2 一元流动(管流)的连续性方程	40
3.4 理想流体微团的运动分析	41
3.4.1 流体微团的速度分解公式	41
3.4.2 流体微团的运动类型	42
3.4.3 无旋流动与有旋流动	43
3.5 速度势函数与流函数	44
3.5.1 速度势函数	44
3.5.2 平面流函数	46
3.5.3 平面流函数与势函数的关系	47
3.6 平面势流和势流的叠加	48
3.6.1 基本的平面势流	48
3.6.2 平面势流的叠加	51

思考题	54
习题	54
4 流体动力学	56
4.1 流体运动微分方程及伯努利方程	56
4.1.1 理想流体运动微分方程	56
4.1.2 理想流体的伯努利方程	57
4.1.3 伯努利方程的意义	59
4.2 实际流体的伯努利方程	59
4.2.1 实际流体微元流束的伯努利方程	59
4.2.2 实际流体总流的伯努利方程	60
4.2.3 总流伯努利方程的应用条件	61
4.3 总流伯努利方程可解决的工程实际问题	62
4.3.1 流动方向和能量损失问题	62
4.3.2 压力问题	64
4.3.3 流速与流量的测定	67
4.3.4 有流量分流或汇流的能量方程	68
4.4 稳定流的动量定理及应用	69
4.4.1 稳定流的动量定理	69
4.4.2 流体对弯管的作用力问题	70
4.4.3 自由射流的冲击力问题	71
4.5 动量矩方程及其应用	73
4.5.1 稳定流的动量矩方程	73
4.5.2 叶轮机械的欧拉方程	73
思考题	75
习题	75
5 流体的阻力与水头损失	78
5.1 实际流体的流动微分方程	78
5.1.1 实际流体的受力分析	78
5.1.2 以应力形式表示的运动微分方程	79
5.1.3 广义牛顿内摩擦定律	79
5.1.4 不可压缩黏性流体的 N-S 方程	80
5.2 水头损失产生的原因及其分类	80
5.3 流体运动的两种状态	81
5.3.1 雷诺实验	81
5.3.2 流态的判别标准——雷诺数	82
5.3.3 非圆管路中的雷诺数	83
5.4 圆管中的层流	85

5.4.1	层流的起始	85
5.4.2	层流内部的受力分析	85
5.4.3	层流的速度分布及应力分布	86
5.4.4	圆管层流的沿程损失水头	87
5.5	圆管中的紊流	89
5.5.1	紊流运动的基本特征	89
5.5.2	断面上的速度分布	91
5.5.3	紊流切应力	92
5.5.4	紊流的沿程损失水头	92
5.6	管路中的局部损失水头与计算	98
5.6.1	局部损失产生的原因	98
5.6.2	管径突然扩大的局部损失	99
5.6.3	局部损失水头的计算公式	99
5.6.4	管路中的总水头损失	101
5.7	边界层理论	102
5.7.1	边界层的概念	103
5.7.2	边界层的基本特征	103
5.7.3	边界层的分离与绕流阻力	104
	思考题	105
	习题	105
6	有压管路与孔口、管嘴出流	108
6.1	有压管路概述	108
6.1.1	有压管路的分类	108
6.1.2	有压管路特性	109
6.1.3	有压管路恒定流的水力计算问题	109
6.2	简单管路的水力计算	110
6.2.1	简单短管的水力计算	110
6.2.2	简单长管的水力计算	111
6.2.3	虹吸管和倒虹吸管的水力计算	113
6.2.4	离心泵管路系统的水力计算	114
6.3	复杂管路的水力计算	115
6.3.1	串联管路的水力计算	115
6.3.2	并联管路的水力计算	115
6.3.3	管网的水力计算	116
6.3.4	连续均匀出流管路的水力计算	117
6.4	管路中的水击	118
6.4.1	水击波的产生和传播过程	118
6.4.2	水击压力的计算	120

6.4.3 水击危害的预防	121
6.5 孔口出流	122
6.5.1 薄壁小孔口的出流	122
6.5.2 大孔口的出流	124
6.5.3 非恒定水头下的孔口出流	125
6.6 管嘴出流	126
6.6.1 圆柱形管嘴的出流	126
6.6.2 管嘴的真空度	127
6.6.3 其他常用管嘴的出流	128
思考题	129
习题	130
7 明渠均匀流与堰流	133
7.1 明渠流的概念	133
7.1.1 明渠的横断面	133
7.1.2 渠道的底坡	134
7.1.3 渠道的允许流速	135
7.2 明渠均匀流的水力特征	135
7.2.1 明渠均匀流的水力特征及其形成条件	135
7.2.2 明渠均匀流的基本公式	136
7.3 梯形断面明渠均匀流的水力计算	138
7.3.1 水力最优断面	138
7.3.2 梯形断面明渠均匀流的三类基本问题	139
7.4 复式断面明渠均匀流的水力计算	142
7.5 堰流	144
7.5.1 堰流的水力特征	144
7.5.2 堰流的分类	145
7.5.3 堰流的基本公式	146
思考题	146
习题	147
8 气体的一元流动	148
8.1 声速与马赫数	148
8.1.1 声速	148
8.1.2 马赫数	150
8.2 气体的一维定常等熵流动	151
8.2.1 气体一维定常流动的基本方程	151
8.2.2 滞止参数	153
8.3 气体一维定常等熵变截面管流	155

8.3.1 气流速度与密度的关系	155
8.3.2 气流速度与通道截面的关系	155
8.3.3 喷管	156
思考题	159
习题	159
9 量纲分析与相似理论	160
9.1 量纲及量纲分析法	160
9.1.1 量纲	160
9.1.2 量纲和谐原理	162
9.1.3 瑞利法	162
9.1.4 π 定理	163
9.2 相似理论	165
9.2.1 流动相似	165
9.2.2 相似准则	167
9.3 模型实验与近似模型法	170
9.3.1 模型实验	170
9.3.2 近似模型法	171
9.3.3 模型实验的应用	173
思考题	174
习题	175
10 计算流体力学基础	177
10.1 CFD 基础知识	177
10.1.1 CFD 的概念与作用	177
10.1.2 CFD 的特点	177
10.1.3 CFD 仿真的基本步骤	178
10.2 常用 CFD 软件介绍	179
10.2.1 PHOENICS	179
10.2.2 CFX	180
10.2.3 STAR-CD	181
10.2.4 FLUENT	181
10.3 工程实例分析	182
思考题	188
习题	188
参考文献	189

1.1 流体力学的发展概况、研究对象和研究方法

1.1.1 流体力学的发展概况

流体力学和其他自然科学一样,是随着生产实践而发展起来的。我国古代劳动人民早在春秋战国和秦朝时期就已修建了都江堰、郑国渠和灵渠,特别是都江堰工程所总结的“深淘滩,低作堰”,反映了当时人们对明渠水流和堰流已有了一定的认识。公元1363年制作的计时工具——铜壶滴漏就是利用孔口出流,水位随时间变化的规律制成的,反映当时人们对孔口出流已有相当认识。与我国情况相类似,早在几千年前,在埃及、巴比伦、希腊和印度等地,为了发展农业和航运事业,也修建了大量的渠系。古罗马人则修建了大规模的供水管道系统。这些事例说明人们在大量的生产实践中已认识了一些水流运动的规律,并成为了流体力学建立和发展的推动力。

流体力学的基本理论形成可追溯到公元前3世纪。古希腊科学家阿基米德(Archimedes)在其撰写的《论浮体》中,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。但在此后直至15世纪欧洲文艺复兴时代的1700余年中,流体力学在系统理论上的进展非常缓慢。

公元15世纪至17世纪,流体力学的研究以实验研究为主,水静压力、大气压力、压力传递和水的切应力等静力学问题得到了准确的实验验证。公元18世纪,流体运动规律的系统理论形成,并沿着两个研究方向发展。一个是建立在经典力学基础上,运用数学分析的方法,建立流体运动的基本方程。这些方程包括伯努利方程、欧拉方程、纳维-斯托克斯方程、雷诺方程等;由于这些纯理论的推导所作的某些假定与实际不尽相符,或由于数学上难以求解,这些方程并不能完全解决实际工程中的复杂问题。与此同时,另一个研究方向则以工程实际为基础,从大量的实验和实际观测中总结经验关系式,对这些经验关系式简化后进行数学分析,建立各运动要素间的定量关系,最终形成经验公式用于流体的测量。该研究方向得到了广泛的工程应用,如毕托发明的流速测量的毕托管、文丘里研制的测量有压管路的文丘里管、谢才建立的计算明渠均匀流的谢才公式、曼宁推导的计算谢才系数的曼宁公式等。

19世纪,为了解决许多工程问题,尤其是要解决黏性流体影响的问题,工程师们将流体运动的基本方程与经验公式相结合进行研究。1822年,纳维(法)建立了黏性流体的基本运动方程;1845年,斯托克斯(英)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)。这就形成了水力学,它是实际流体动力学的理论基础。

20 世纪初, 普朗克学派将 N-S 方程作了简化, 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。这一理论既明确了理想流体的适用范围, 又能计算实际流体运动时的摩擦阻力。同时, 以儒科夫斯基、恰普雷金等为代表的科学家, 开创了以无黏不可压缩流体位势流理论为基础的机翼理论, 阐明了机翼如何产生升力, 从而空气能把很重的飞机托上天空。机翼理论的正确性, 使人们重新认识无黏流体的理论, 肯定了它指导工程设计的重大意义。势流理论广泛应用于水波、潮汐、涡旋运动、声学等方面的研究。

随着现代工业和新技术的迅速发展, 流体力学理论在喷气推进和火箭技术的应用使气体高速流动的研究进展迅速, 气体动力学理论不断完善。与此同时, 由于民用和军用生产的需要, 液体动力学等学科也有很大进展。20 世纪 50 年代起, 电子计算机的飞速发展和广泛应用, 使原来用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。

科学技术的高速发展, 以及科学技术和工业生产的日趋复杂, 使现代流体力学的研究内容有了明显的变化, 出现了与相关的邻近学科相互交叉渗透, 形成新的交叉学科或边缘学科, 如生物流体力学、化学工程流体力学、稀薄气体力学、磁流体力学和物理-化学流体力学等。由于流体力学的发展趋向于渗入更为广泛的领域, 它已成为能源、水利技术、流体机械、气象学、航空航天等多学科的重要理论基础。

1.1.2 流体力学的研究任务与对象

流体力学是力学的一个重要分支, 它主要研究流体在静止和运动时所遵循的基本规律, 以及流体与固体之间的相互作用, 用以解决工程实际问题。流体力学的研究包含流体静力学、流体运动学和流体动力学三部分。

流体力学研究的对象是流体。物质常见的存在状态是固态、液态和气态, 它们分别称为固体、液体和气体。流体包括液体和气体, 通常说流动的物质称为流体。其力学定义是: 在任何微小剪切力的持续作用下能够连续不断变形的物质, 称为流体。如水、空气、汽油等就是流体。流体在剪切力作用下将发生连续不断的变形运动, 直至剪切力消失为止。流体的这种性质称为易流动性。

流体与固体的差别在于: 固体在静止状态下能抵抗一定数量的拉力、压力、剪切力, 当其受到外力作用时, 将产生相应的变形以抵抗这个外力; 而静止的流体不能抵抗无论多么小的拉力和剪切力, 只能承受压力。液体和气体都具有易流动性, 两者不同之处在于: 气体比液体更容易变形 (流动), 这是因为气体的分子分布比液体的稀疏得多 (即分子距大, 分子间引力小), 而且气体还存在体积的易变性。此外, 液体通常存在自由表面, 这是固体和气体所没有的。

1.1.3 流体力学的研究方法

流体力学的研究方法包括现场观测、理论分析、实验研究和数值计算等。

现场观测方法是对自然界固有的流动现象, 利用各种仪器进行系统观测, 从而总结出流体运动的规律, 并借以预测流动现象的演变。

理论分析方法是根据流体运动的普遍规律, 利用数学分析的手段, 研究流体的运动, 解释已知的现象, 预测可能产生的结果。理论分析时, 首先是建立“力学模型”, 流体力

学中最常用的基本模型有：连续介质、牛顿流体、不可压缩流体、理想流体、平面流动等。其次是针对流体运动的特点，用数学语言将质量守恒、动量守恒、能量守恒等定律表达出来，从而得到连续性方程、动量方程和能量方程。最后是求解，并结合具体流动，解释这些解的物理含义和流动机理。

实验研究方法在流体力学研究中占有极其重要的地位，实验能显示运动特点及其主要趋势，有助于形成概念，检验理论的正确性。实验研究方法是通过对具体流动的观测来认识流体运动的规律。流体力学的实验研究主要包括原型观测、系统实验和模型实验，其中以模型实验为主。

数值计算方法是伴随现代计算机技术及其应用而出现的一种方法。它广泛采用有限差分法、有限单元法、有限体积法等将流体力学中一些难以用解析方法求解的理论模型离散为数值模型，用计算机求得定量描述流体运动规律的数值解。

解决流体力学问题时，以上方法是相辅相成的。实验只有在理论指导下，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现场观测和实验室模拟给出物理图案或数据，以建立流动的力学模型和数学模式，并且还需要依靠实验来检验这些模型和模式的完善程度。此外，实际流动往往异常复杂（如紊流），理论分析和数值计算会遇到巨大的数学和计算方面的困难，得不到具体结果，只能通过现场观测和实验室模拟进行研究。

1.2 流体质点与连续介质假设

流体是由大量不断地做无规则热运动的分子所组成。从微观角度看，由于分子间存在间隙，且分子不断地做随机热运动，因此以离散的分子为对象来研究流体的运动将是极其复杂的。

流体力学所要研究的并不是个别分子的微观运动，而是流体宏观运动的特性，如密度、压力和温度等，即大量分子运动的统计平均特性。因此，在流体力学中，引入流体质点的概念，并把流体看成是由连续分布的流体质点所组成。

1.2.1 流体质点的概念

流体质点是指含有大量分子并能保持其宏观力学特性的一个微小体积。可以认为组成流体的最小物理实体是流体质点，而不是流体分子。现以密度为例说明如下。

在流体中任意取一面积为 ΔV 的微元，其质量为 Δm ，则其密度可表示为：

$$\rho_m = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta m}{\Delta V} \quad (1-1)$$

$\Delta V \rightarrow 0$ 不能理解为数学上的趋近于零，只能理解为一个很小的值（微小体积）。在标准状态下， 1mm^3 中含有 2.7×10^{16} 个空气分子，或含有 3.4×10^{19} 个水分子。例如 10^{-6}mm^3 （一粒灰尘）的体积，比工程中常见的物体小得多，但仍由大量的分子组成。这种宏观上足够小、微观上足够大的微小体积就称为流体质点。

因此，对于一般工程问题，完全可将流体视为由连续分布的质点所组成，而流体质点的物理性质及其运动参量就作为研究流体整体运动的出发点，并由此建立起流体的连续介

质模型。

如图 1-1 所示, 在流体中一点 $A(x, y, z)$ 处的流体微团 ΔV , 当 $\Delta V \rightarrow 0$ 时, 这个流体微团流体趋于点 A , 该点为流体质点。在今后的讨论中, 通常认为流体质点在空间上是一个点, 体积趋于零, 但不等于零。

1.2.2 连续介质假设

流体是由无数连续分布的流体质点所组成的连续介质, 此假设称为连续介质假设。这一假设是流体力学中第一个根本性的假设, 由欧拉于 1775 年提出。

在流体力学中引进了连续介质假设以后, 描述流体宏观运动的物理量, 如速度、密度、压强等, 都可以表示成空间坐标和时间的连续函数, 数学表达式为:

$$\mathbf{v} = \mathbf{v}(x, y, z, t), \rho = \rho(x, y, z, t), p = p(x, y, z, t) \quad (1-2)$$

因此, 从宏观上研究流体的运动规律, 有理由把流体视为连续介质, 即流体是在空间上和时间上连续分布的物质。1775 年欧拉在建立流体运动的微分方程时, 就是采用连续介质这样一个基本假说, 认为液体和气体充满一个体积时不留任何空隙, 其中没有真空、没有分子间隙, 流体的密度、温度等物理量是连续分布的。

实践证明, 采用连续介质模型来解决一般工程实际问题, 其结果是能满足要求的。但在一些特殊的情况下, 连续介质的假设是不能成立的。例如, 航天器在高空稀薄气体中飞行时, 气体分子的平均距离与航天器的尺寸具有相同的量级, 超音速气流中的激波厚度与气体分子平均自由程为同一量级, 血液在微血管里 (直径约为 10^{-3}mm) 的运动, 这些情况都不能采用连续介质假设。

1.3 流体的主要物理性质

1.3.1 流体的密度、比体积和相对密度

(1) 密度。单位体积流体所具有的质量称为流体的密度, 用 ρ 表示。对均质流体有:

$$\rho = \frac{M}{V} \quad (1-3)$$

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 。

流体的密度一般与流体的种类、压强和温度有关。对于液体, 密度随压强和温度的变化很小, 可视为常数。例如, 通常取水的密度为 1000kg/m^3 , 水银的密度为 13600kg/m^3 , 油的密度为 $800 \sim 900\text{kg/m}^3$ 。

(2) 比体积。流体密度的倒数称为流体的比体积, 即单位质量流体所具有的体积, 用 v 表示, 单位为 m^3/kg 。例如, 水的比体积为 $0.001\text{m}^3/\text{kg}$, 水银的比体积为 $7.4 \times 10^{-5}\text{m}^3/\text{kg}$ 。

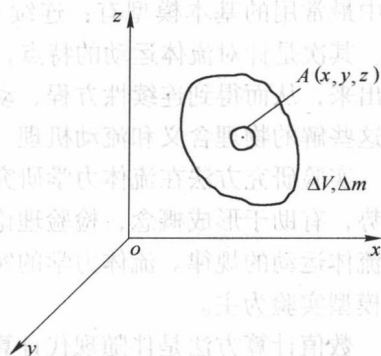


图 1-1 流体微团和流体质点

$$v = \frac{1}{\rho} \tag{1-4}$$

(3) 相对密度。某一液体的密度 ρ 与温度为4℃的蒸馏水的密度 ρ_w 的比值称为相对密度，用 d 表示。例如，水的相对密度为1，水银的相对密度为13.6。

$$d = \frac{\rho}{\rho_w} \tag{1-5}$$

对于非均质的流体，如图 1-1 所示，围绕 A 点取流体微团 ΔV ，其质量为 Δm 。当 $\Delta V \rightarrow 0$ 时，A 点处的密度为：

$$\rho = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta m}{\Delta V} = \frac{dm}{dV} \tag{1-6}$$

1.3.2 流体的压缩性和膨胀性

在温度一定的条件下，流体的体积随压强的增加而缩小，这种特性称为流体的压缩性。在压强一定的条件下，流体的体积随温度的升高而增大，这种特性称为流体的膨胀性。

(1) 压缩性。流体的压缩性通常以体积压缩系数 β 来表示，它是温度一定而压强升高1个单位时流体的体积缩小率，如图 1-2 所示。

$$\beta = \lim_{\Delta p \rightarrow 0} \frac{\Delta V/V}{\Delta p} = -\frac{1}{V} \frac{dV}{dp} \tag{1-7}$$

β 的单位为 $m^2/N = 1/Pa$ 。由于当 dp 为正值时， dV 必为负值，故上式加一负号，以使 β 为正值。压缩系数越小，说明流体越不容易被压缩。压缩系数 β 的倒数称为流体的体积弹性模量 E 。

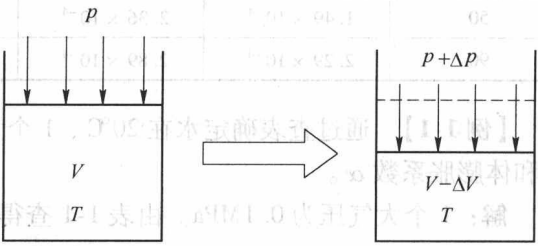


图 1-2 流体在等温下的体积压缩

$$E = \frac{1}{\beta} = -V \frac{dp}{dV} \tag{1-8}$$

E 的单位与压强相同为 $N/m^2 = Pa$ 。体积弹性模量 E 越大，说明流体越不容易被压缩。水在不同温度与压强下的体积弹性模量见表 1-1。通常液体的压缩性很小，可以忽略。

表 1-1 水在不同温度与压强下的弹性模量 E

温度/℃	压强/MPa				
	0.5	1	2	4	8
E/Pa					
0	1.852×10^9	1.862×10^9	1.882×10^9	1.911×10^9	1.940×10^9
5	1.891×10^9	1.911×10^9	1.931×10^9	1.970×10^9	2.030×10^9
10	1.911×10^9	1.931×10^9	1.970×10^9	2.009×10^9	2.078×10^9
15	1.931×10^9	1.960×10^9	1.985×10^9	2.048×10^9	2.127×10^9
20	1.940×10^9	1.980×10^9	2.019×10^9	2.078×10^9	2.137×10^9

(2) 膨胀性。流体的膨胀性通常用线热膨胀系数或体膨胀系数来表示, 单位为 $1/^\circ\text{C}$ 。体膨胀系数 α 是指在一定压强下, 增加单位温度时, 所引起的体积相对变化率, 如图 1-3 所示。水在不同压强和温度下的体膨胀系数见表 1-2。

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

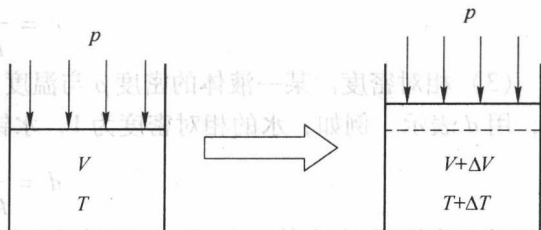


图 1-3 流体在定压下的体膨胀系数 α

表 1-2 水在不同压强和温度下的体膨胀系数 α

压强/MPa	温度/ $^\circ\text{C}$				
	1 ~ 10	10 ~ 20	40 ~ 50	60 ~ 70	90 ~ 100
	$\alpha/^\circ\text{C}^{-1}$				
0.1	0.14×10^{-4}	1.50×10^{-4}	4.22×10^{-4}	5.56×10^{-4}	7.19×10^{-4}
10	0.43×10^{-4}	1.65×10^{-4}	4.22×10^{-4}	5.48×10^{-4}	7.04×10^{-4}
20	0.72×10^{-4}	1.83×10^{-4}	4.26×10^{-4}	5.39×10^{-4}	
50	1.49×10^{-4}	2.36×10^{-4}	4.29×10^{-4}	5.23×10^{-4}	6.61×10^{-4}
90	2.29×10^{-4}	2.89×10^{-4}	4.37×10^{-4}	5.14×10^{-4}	6.21×10^{-4}

【例 1-1】 通过查表确定水在 20°C 、1 个大气压下的体积压缩系数 β 、体积弹性模量 E 和体膨胀系数 α 。

解: 1 个大气压为 0.1MPa 。由表 1-1 查得, 体积弹性模量 E 为:

$$E = 2.20 \times 10^9 \text{N/m}^2$$

由式 (1-8) 可得, 体积压缩系数 β 为:

$$\beta = \frac{1}{E} = \frac{1}{2.20 \times 10^9} = 0.455 \times 10^{-9} \text{m}^2/\text{N}$$

由表 1-2 查得, 体膨胀系数 α 为:

$$\alpha = 1.5 \times 10^{-4} ^\circ\text{C}^{-1}$$

为了研究问题的方便, 规定体积压缩系数和体膨胀系数等于零的流体称为不可压缩流体。这种流体受压后体积不减小, 受热体积不膨胀, 因而其密度、比体积和相对密度均为常数。

液体的可压缩性很小, 例如当压强增加 1 个大气压时, 水的相对密度变化为 0.0005% , 因此在通常情况下, 可忽略液体的压缩性和膨胀性, 作为不可压缩流体处理。只有在水中爆炸、管道内发生水击等极少数情况下, 才考虑水的压缩性。

气体的可压缩性约是水的 5000 倍, 一般情况下必须考虑气体的可压缩性。当常温下空气速度低于 100m/s 时, 气体密度相对变化值约小于 3% , 此时可以按不可压缩流体处理。普通列车和汽车均达不到 100m/s (360km/h) 的速度, 大部分工程管流和一部分动力机械的流速也不超过此范围, 因此按不可压缩流体模型分析气体流动的范围是相当大的。