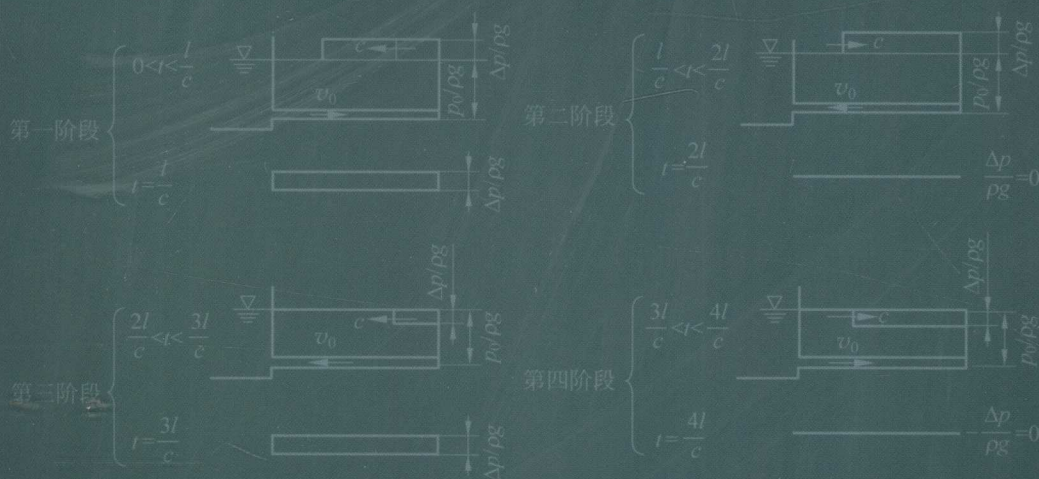


高等院校土木工程专业规划教材

水力学

张莉莉 王峰 等 编著



清华大学出版社

高等院校土木工程专业规划教材

水力学

张莉莉 王峰 等 编著

清华大学出版社

内 容 简 介

本书是根据给排水科学与工程专业培养方案和高等院校给排水科学与工程专业本科四年制课程的教学基本要求,同时考虑满足其他专业教学要求而编写的流体力学课程通用教材。

全书包括流体静力学,流体运动学,流体动力学基础,量纲分析与相似原理,流动阻力和能量损失等11章内容。本书理论阐述简明严谨,便于教学。教师可根据不同专业的具体要求进行选讲。

本书可作为工科院校给排水工程、土木工程、道路桥梁工程、环境工程等专业流体力学(水力学)教材,也可作为注册结构工程师、公用设备工程师流体力学考试参考书。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

水力学/张莉莉,王峰等编著.--北京:清华大学出版社,2015

高等院校土木工程专业规划教材

ISBN 978-7-302-41103-1

I. ①水… II. ①张… ②王… III. ①水力学—高等学校—教材 IV. ①TV13

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 176631 号

责任编辑:赵益鹏 赵从棉

封面设计:陈国熙

责任校对:刘玉霞

责任印制:王静怡

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座 邮 编:100084

社总机:010-62770175

邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质 量 反 馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 装 者:北京密云胶印厂

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm

印 张:16.25

字 数:394 千字

版 次:2015 年 9 月第 1 版

印 次:2015 年 9 月第 1 次印刷

印 数:1~2500

定 价:38.00 元

产品编号:057131-01

前 言

流体力学是许多工科专业非常重要的专业基础课,本书就是在满足给排水科学与工程专业的课程教学的基础上,同时兼顾土木工程、道路桥梁工程、环境工程、水利工程等专业的基本要求而编写的流体力学课程通用教材,也可作为注册结构工程师、公用设备工程师流体力学考试参考书。

全书共分11章,包括:绪论,流体静力学,流体运动学,流体动力学基础,量纲分析与相似原理,流动阻力和能量损失,孔口、管嘴和管路流动,明渠均匀流,明渠非均匀流,堰流和闸孔出流,渗流。本书注重强化理论基础,重点培养学生的理论应用能力。本书以不可压缩的流体为研究对象,加深和扩宽理论基础,应用流体基本方程分析流动问题,理论联系实际,加强知识的实践应用性。

本书是编者结合多年的教学经验,精选和吸收国内外有关教材的优点,并适当加入学科新发展的基础上编著而成的,理论内容阐述简明严谨。不同专业的教师可根据相关专业的具体要求将内容进行筛选,保证教学的完整性和灵活性。书中各章均配有一定数量的典型例题、思考题和习题,并在书后附有部分习题答案。其中有很多习题,对于继续深造的工程技术人员具有一定的参考价值。

本书由沈阳大学张莉莉、燕山大学王峰、沈阳航空航天大学陈健和河南城建学院虞婷婷共同编著完成,其中第1、6、8、9章由张莉莉编写;第2、3、4、7章由王峰编写;第5章由陈健编写;第10、11章由沈阳大学张莉莉和虞婷婷编写;全书由张莉莉统编定稿。

本书的编写得到了清华大学出版社和沈阳大学的大力支持,同时在全书的绘图和校阅中得到了赵佳利和乔蕊的热心帮助,在此表示衷心的感谢。

由于作者编写水平有限,书中难免有不足和疏漏,敬请读者不吝指教。

编 者

2015年6月

第 1 章 绪论	1
1.1 流体力学及其任务	1
1.1.1 流体力学研究的对象	1
1.1.2 流体力学的发展	2
1.1.3 流体力学的任务	4
1.2 常用的流体力学模型	4
1.2.1 流体的连续介质力学模型	5
1.2.2 不可压缩流体的力学模型	5
1.2.3 理想流体力学模型	5
1.3 分析流体力学的理论基础	6
1.4 作用在流体上的力	6
1.4.1 力的分析方法和力的分类	7
1.4.2 质量力	7
1.4.3 表面力	7
1.5 流体的主要物理性质	8
1.5.1 惯性	8
1.5.2 重力特性	9
1.5.3 压缩性和膨胀性	10
1.5.4 黏性	12
思考题和习题	17
第 2 章 流体静力学	19
2.1 静水压强及其特性	19
2.1.1 静水压强的定义	19
2.1.2 静水压强的特性	19
2.2 流体平衡微分方程及其积分	21
2.2.1 流体平衡微分方程	21
2.2.2 流体平衡微分方程的积分	22
2.2.3 等压面及其特性	23
2.3 重力场中流体静压强的分布规律	23
2.3.1 流体静压强的基本方程式	23

2.3.2	压强的计算基准	25
2.3.3	压强的度量单位	25
2.3.4	压差计	26
2.4	作用于平面的静水压力	27
2.4.1	解析法	28
2.4.2	图解法	30
2.5	作用于曲面的静水压力	32
2.6	作用在潜体和浮体上的静水压力	35
2.7	流体的相对平衡	36
2.7.1	等加速直线运动中流体的平衡	36
2.7.2	等角速度旋转运动中流体的平衡	37
	思考题和习题	38
第3章	流体运动学	43
3.1	描述流体运动的两种方法	43
3.1.1	拉格朗日法	43
3.1.2	欧拉法	44
3.2	流体运动的基本概念	45
3.2.1	恒定流和非恒定流	45
3.2.2	流线和迹线	46
3.2.3	元流和总流	48
3.2.4	流量和断面平均流速	49
3.2.5	流动的分类	50
3.3	连续性方程	52
3.3.1	连续性微分方程	53
3.3.2	恒定总流连续性方程	54
3.4	流体微团的运动分析	55
3.5	有旋流动和无旋流动	57
	思考题和习题	58
第4章	流体动力学基础	60
4.1	流体运动微分方程	60
4.1.1	理想流体运动微分方程	60
4.1.2	黏性流体运动微分方程	61
4.2	恒定元流能量方程	65
4.2.1	理想流体运动微分方程的伯努利积分	65
4.2.2	恒定元流能量方程的物理意义和几何意义	67
4.2.3	黏性流体元流能量方程	68

4.3	恒定总流能量方程	68
4.3.1	恒定总流能量方程的推导	68
4.3.2	能量方程的应用条件和注意事项	70
4.3.3	总水头线和测压管水头线	70
4.3.4	能量方程的应用	71
4.4	恒定总流动量方程	74
4.4.1	恒定总流动量方程的推导	74
4.4.2	动量方程的应用	75
	思考题和习题	77
第5章	量纲分析与相似原理	82
5.1	量纲概念与量纲和谐定理	82
5.1.1	量纲和单位	82
5.1.2	有量纲数和无量纲数	83
5.2	相似概念及其基本内容	83
5.2.1	流动现象相似的原理	83
5.2.2	流体相似的特征	84
5.3	量纲分析和相似准则推导方法	86
5.3.1	量纲和谐原理	86
5.3.2	量纲分析法	87
5.3.3	流体相似准则	90
5.4	模型律的应用举例	95
5.4.1	模型律的选择	95
5.4.2	模型的设计	95
	思考题和习题	97
第6章	流动阻力和能量损失	98
6.1	流动阻力和能量损失分类	98
6.1.1	沿程阻力和沿程水头损失	98
6.1.2	局部阻力及局部水头损失	98
6.1.3	总水头损失	99
6.2	雷诺实验及流态判别	99
6.2.1	雷诺实验	100
6.2.2	流态的判别	102
6.3	沿程水头损失与切应力的关系	103
6.3.1	沿程水头损失	104
6.3.2	均匀流方程式	104
6.3.3	圆管过流断面上切应力分布规律	105
6.4	圆管中的层流运动	105
6.4.1	速度分布及平均流速	105

6.4.2	沿程阻力损失的计算	107
6.5	紊流运动	108
6.5.1	紊流的特征与时均化	108
6.5.2	紊流切应力	109
6.5.3	普朗特混合长度理论	110
6.5.4	黏性底层	112
6.6	紊流的沿程水头损失	114
6.6.1	尼古拉兹实验曲线	114
6.6.2	人工粗糙管 λ 的半经验公式	115
6.6.3	工业管道 λ 的计算	117
6.6.4	沿程阻力系数的经验公式	118
6.7	局部阻力损失计算	120
6.7.1	突然扩大管	121
6.7.2	突然缩小管	122
6.7.3	几种典型管配的局部水头损失系数	122
	思考题和习题	124
第7章	孔口、管嘴和管路流动	127
7.1	孔口恒定出流	127
7.1.1	薄壁小孔口自由出流	127
7.1.2	淹没出流	129
7.2	管嘴出流	130
7.2.1	圆柱形外管嘴恒定出流	131
7.2.2	收缩断面的真空	131
7.2.3	圆柱形外管嘴的正常工作条件	132
7.2.4	其他形式的管嘴	132
7.3	孔口的变水头出流	133
7.4	短管的水力计算	134
7.4.1	短管水力计算的基本公式	134
7.4.2	短管水力计算问题	135
7.5	长管的水力计算	138
7.5.1	简单管路	138
7.5.2	复杂管路	141
7.6	有压管道中的水击	143
7.6.1	水击发生的原因	143
7.6.2	水击压强的计算	145
7.6.3	防止水击危害的措施	146
7.7	离心水泵的原理与应用	146
7.7.1	离心水泵的工作原理	146

7.7.2 离心水泵的性能参数	147
7.7.3 离心泵的性能曲线与工作点的确定	148
思考题和习题	150
第8章 明渠均匀流	154
8.1 明渠的特征	154
8.1.1 明渠底坡	154
8.1.2 明渠断面	155
8.1.3 明渠断面的几何要素	156
8.2 明渠均匀流的特征及形成条件	158
8.2.1 明渠均匀流的特征	158
8.2.2 明渠均匀流的发生条件	158
8.3 明渠均匀流的计算公式	159
8.4 明渠水力最优断面和允许流速	161
8.4.1 水力最优断面	161
8.4.2 允许流速	162
8.5 明渠均匀流水力计算的基本问题	164
8.5.1 校核渠道的输水能力	164
8.5.2 确定渠道底坡	165
8.5.3 确定渠道断面尺寸	166
8.6 无压圆管均匀流	168
8.6.1 无压圆管均匀流的特征	168
8.6.2 无压圆管水力最优条件	169
8.6.3 无压圆管的水力计算问题	170
8.6.4 最大充满度和设计流速	172
8.7 复式断面明渠的水力计算	172
思考题和习题	173
第9章 明渠非均匀流	175
9.1 明渠非均匀流的基本问题	175
9.1.1 明渠非均匀流形成条件	175
9.1.2 明渠非均匀流的特征	176
9.1.3 明渠非均匀流的主要研究问题	176
9.2 明渠水流的流态及判别标准	176
9.2.1 明渠水流流态	176
9.2.2 微幅干扰波波速	177
9.2.3 弗劳德数 Fr	179
9.3 断面单位能量与临界水深	180
9.3.1 断面单位能量	180

9.3.2	临界水深	181
9.3.3	临界底坡	182
9.4	水跃与水跌	183
9.4.1	水跃	183
9.4.2	水跌	187
9.5	明渠恒定非均匀渐变流的微分方程	188
9.6	棱柱形渠道中恒定非均匀渐变流水面曲线分析	190
9.6.1	渐变流水面曲线变化分析	190
9.6.2	渠道底坡变化时水面曲线的分析	197
9.7	明渠非均匀渐变流水面曲线的计算	198
9.7.1	分段求和法基本公式	198
9.7.2	渠道的分段原则	199
9.7.3	分段求和法的计算方法	200
	思考题和习题	202
第 10 章	堰流和闸孔出流	205
10.1	堰流及其水力特征	206
10.1.1	堰和堰流	206
10.1.2	堰流的分类	206
10.1.3	堰流基本公式	207
10.2	宽顶堰	207
10.2.1	自由式无侧收缩宽顶堰	207
10.2.2	淹没式无侧收缩宽顶堰	209
10.2.3	侧收缩宽顶堰	209
10.3	薄壁堰	211
10.3.1	矩形薄壁堰	211
10.3.2	三角形薄壁堰	213
10.3.3	梯形薄壁堰	214
10.4	实用断面堰	215
10.4.1	实用断面堰及其分类	215
10.4.2	实用断面堰的计算	216
10.5	闸孔出流	217
10.5.1	闸孔出流与堰流的水流状态比较	217
10.5.2	闸孔出流特征	217
10.5.3	闸孔自由出流	218
10.5.4	闸孔淹没出流	220
10.6	桥孔过流水力计算	220
10.6.1	小桥孔过流的水力特性	220
10.6.2	小桥孔过流的水力计算	221

思考题和习题	224
第 11 章 渗流	225
11.1 概述	225
11.1.1 渗流理论的应用	225
11.1.2 水在土壤中的存在状态	225
11.1.3 渗流模型	226
11.2 渗流基本定律	226
11.2.1 达西定律	227
11.2.2 达西定律的适用条件	227
11.2.3 渗流系数	228
11.3 地下水的均匀流和非均匀流	229
11.3.1 恒定均匀渗流	229
11.3.2 恒定非均匀渐变渗流	229
11.4 集水廊道和井的渗流计算	233
11.4.1 集水廊道	234
11.4.2 潜水井	235
11.4.3 自流井	236
11.4.4 大口井与基坑排水	237
11.4.5 井群	238
思考题和习题	240
部分习题答案	243
参考文献	248

绪论

1.1 流体力学及其任务

1.1.1 流体力学研究的对象

流体力学是力学的一个分支,主要是研究流体静止和运动状态下的力学规律及其在工程实际中应用的一门学科。

在常温常压下,依据理论力学的划分方法,自然界中的物质可分为三种状态——固态、液态和气态;而依热力学方法,可把物质划分为流体和固体(非流体)两大类,即液体和气体统称为流体,具有代表性的液体是水,具有代表性的气体是空气(大气)。

1. 固体、液体、气体力学特性的不同

1) 固体

由于固体分子间的距离很小,内聚力很大,所以固体能够保持一定的体积和形状。固体按受力和变形关系分为塑性体和弹性体。物体在一个给定的力作用下产生一定的变形,力撤除以后,产生永久变形的固体为塑性体;力撤除以后,变形立即消失的固体为弹性体。固体能够承受一定大小的拉力、压力和剪切力。

2) 液体

与固体相比,液体分子间的距离较大,内聚力较小,它只能保持一定的体积,却没有固定的形状。液体不易被压缩,有自由表面,具有界面现象——表面张力特性。液体几乎不能承受拉力,在静止状态下也不能承受剪切力,极易发生剪切变形或流动,但液体与固体一样能够承受压力。

3) 气体

与固体和液体相比,气体分子间的距离很大,几乎不存在内聚力,分子可以自由运动,因此气体既无一定体积又无一定的形状。它能够扩散充满其所占据的有限空间,因而气体极易膨胀和压缩,没有自由表面,无界面现象——无表面张力特性。

2. 流体的基本特征

流体的基本特性是具有易流动性。所谓易流动性就是指,流体在静止时不能承受任何小的剪切力的性质。如果流体承受了剪切力,不管力多小,其静止状态都会被破坏。现实生

活中,比如微风吹过平静的湖水,水面受到沿着水面作用的剪切力(气流的摩擦力)作用而发生流动;斜坡上流动的水,因为受到重力在坡面方向的切向分力而往低处流淌。这些流动现象都充分体现了流体的易流动性。另外,无论流体处于静止还是运动状态,都几乎不能承受拉力。

固体在剪切力的作用下是可以维持平衡的,所以固体没有流动性。易流动性是流体区别于固体的最显著力学特征。

1.1.2 流体力学的发展

流体力学是一门古老的学科,至今已发展了 2000 多年。同时,流体力学与许多学科是相互渗透、相得益彰的,这使得这门古老的学科不断地获得新鲜血液,从而更富有青春和活力。

流体力学的发展演变大体上分为以下四个阶段。

1. 第一阶段(16 世纪以前)——萌芽形成阶段

人类对流体力学的认识是从治水、灌溉和航行等方面开始的。公元前 2286—公元前 2278 年,大禹采用疏壅导滞的方法治水,表明当时人们已经认识到治水必须“顺水之性”。

春秋、战国和秦朝时期,为了灌溉的需要,公元前 256—公元前 210 年间修建了都江堰、郑国渠和灵渠三大灌溉渠道,特别是公元前 250 年左右,四川成都开始修建的都江堰工程中设置了平水池和飞沙堰,并总结出“深淘滩,低作堰”的方法。这些反映了当时人们对明渠水流和堰流流动规律等已有了一定的认识,并居于世界领先水平。

公元前 485 年开始修建的京杭大运河,形成于隋代,发展于唐、宋,最终在元代成为沟通海河、黄河、淮河、长江、钱塘江五大水系,纵贯南北的水上交通要道,极大地改善了我国南北运输的条件。运河多处使用的船闸,充分表明了我国劳动人民在建设水利工程方面的聪明才智。

东汉初年(约公元 31 年),杜诗发明了水排,利用山溪水流带动鼓风机转动,进行鼓风炼铁,其水力装置原理即近代水轮机的先驱,其出现早于欧洲 1000 多年。

古代的计时工具——铜壶滴漏,是利用孔口出流使铜壶的水位发生变化,进而计算时间,说明当时人们对孔口出流的规律已有一定的认识。

明朝水利专家潘季驯(1521—1595)提出了“筑堤防溢流,建坝减水,以堤束水,以水攻沙”和“借清刷黄”的治黄原则。

清朝雍正年间,何梦瑶在《算迪》一书中提出流量等于过水断面面积乘以断面平均流速的计算方法。

最早从事流体力学现象系统研究,并使之成为一门学科的是古希腊哲学家和物理学家阿基米德(Archimedes,公元前 287—前 212 年),他在公元前 250 年左右写的《论浮体》一书中,首次提出了著名的浮力定律,奠定了流体静力学的基础。此后,直到文艺复兴时期(14 世纪到 16 世纪)以前,还没有形成系统的流体力学理论。15 世纪以后,在城市建设、航海和机械工业发展需求的推动下,人们对流体运动规律的认识不断深入。

2. 第二阶段(16—18 世纪中叶)——独立学科形成阶段

15 世纪末—16 世纪初,由意大利开始的文艺复兴,使流体力学长期停滞不前的局面有所改变。16 世纪初,意大利物理学家达·芬奇(Leonardo da Vinci, 1452—1519)在观察和实验的基础上写了《论水的流动和水的测量》一文,探讨了孔口泄流和不可压缩流体恒定流的质量守恒连续性原理。

1650 年,法国数学家、物理学家帕斯卡(Pascal, 1623—1662)通过现场测量,提出了流体静力学的基本关系式,建立了流体中压强传递的帕斯卡定律。

1686 年,牛顿(Newton, 1642—1727)通过分析和实验,在《自然哲学的数学原理》一书中提出了牛顿内摩擦定律,为建立黏性流体运动方程组创造了条件。

1738 年,瑞士物理学家、数学家伯努利(Bernoulli, 1700—1782)对孔口出流和变截面管流进行了细致的观测,在其名著《流体动力学》中提出了不可压缩理想流体运动的能量方程——伯努利方程。

1753 年,瑞士数学家、物理学家欧拉(Euler, 1707—1783)提出了流体力学中一个根本性的假设,即把流体视为连续介质;1755 年,他又提出了流体运动的描述方法(欧拉方法)和理想流体运动方程(欧拉运动方程),最早应用微积分的数学分析方法来研究流体力学问题,为理论流体力学的发展开辟了新的途径,奠定了古典流体力学的基础。

3. 第三阶段(18 世纪中叶—19 世纪末)——理论与实验双向发展阶段

1783 年,法国数学家、天文学家拉格朗日(Lagrange, 1736—1813)在总结前人工作的基础上,提出了另外一种描述流体运动的方法(拉格朗日法)。拉格朗日最先引进流函数的概念,并最先获得理想流体无旋流动所应满足的动力学条件,提出求解这类流体运动的方法,进一步完善了理想流体无旋流动的基本理论。

1823 年法国工程师纳维(Navier, 1785—1836),1845 年英国数学家、物理学家斯托克斯(Stokes, 1819—1903),分别用不同的假设和方法,建立了不可压缩实际流体的运动方程(纳维-斯托克斯运动方程,简称 N-S 方程),为研究实际流体运动奠定了理论基础。

1847 年,英国物理学家、生理学家亥姆霍兹(Helmholtz, 1821—1894)用数学形式表达出一般的能量守恒原理;1858 年,他将流体质点的运动分解为平动、变形和旋转,提出了亥姆霍兹速度分解定律,推广了理想流体的研究范围,对工程流体力学的发展有很大影响。

与此同时,为了解决实际生产问题,实验流体力学逐步发展起来。在这方面做出代表性研究成果的学者主要有毕托(Pitot, 1695—1771)、文丘里(Venturi, 1746—1822)、谢才(Chezy, 1718—1798)和曼宁(Manning, 1816—879)等人。他们主要是从大量实验和实际观测数据中总结一些实用的经验关系式,并利用简化的基本方程进行数学分析,建立各运动要素之间的定量关系。

1883 年,英国工程师、物理学家雷诺(Reynolds, 1842—1912)在圆管中进行了一系列的流体流动实验,发现流体流动的两种形态(层流和紊流)及其判别准则。1895 年,雷诺又引入紊流应力的概念,建立了不可压缩实际流体的紊流运动方程(雷诺方程),为紊流的理论研究奠定了基础。

4. 第四阶段(20 世纪初至今)——飞跃发展阶段

19 世纪末—20 世纪中叶,随着生产力和科技的迅速发展,所遇到的流体力学问题越来越复杂,已不能单靠理论或实验来解决问题,要求理论和实验相结合,这促使古典流体力学和实验流体力学相结合,形成了现代流体力学。

1904 年,德国工程师、力学家普朗特(Prandtl,1878—1953)将实验与理论流体力学很好地结合起来,创立了边界层理论。这一基本理论建立了理想流体研究和实际流体研究之间的内在联系,对流体力学的发展具有划时代的意义。

1912 年,匈牙利工程师卡门(Karman,1881—1963)发现了“卡门涡街”现象,研究了卡门涡街的稳定性。

1933 年,德国工程师尼古拉兹(Nikuradze,1894—1979)对人工粗糙管道进行了系统的测定工作,为补充边界层理论、推导紊流的半经验公式提供了可靠的依据。

1947 年,美国研制出第一台电子计算机,以计算机为工具的数值计算方法得到迅速发展。目前,流体力学从研究手段上分为理论流体力学、实验流体力学和计算流体力学。这三大部分构成了流体力学的完整体系,它们相辅相成,推动着这一学科不断向前发展。

1.1.3 流体力学的任务

流体力学从人类与自然斗争的过程中发展起来,又用以指导人类更好地改造自然,是为人类创造幸福的一门学科。流体力学研究的任务是如何把流体静止和运动的力学规律有效地应用到各个实际工程领域中,改造大自然,造福于人类。

流体力学广泛应用于航空、交通、能源、建筑、机械、化工等领域。可以说,目前已很难找到一个与流体力学完全没有联系的领域。在船舶与海洋工程领域,船舶与下水运载器的外形设计、海洋结构物的设计、海浪与海流的描述以及海洋能的开发和利用等基本问题,都向流体力学提出了广泛的研究课题;在海岸与港口航道工程中,避风港湾、护岸堤坝以及内河航道的设计等都需要流体力学知识;在土木工程领域,风对高耸建筑物的荷载作用、基坑排水和地基抗渗稳定处理等都有赖于水力的分析和计算;在公路和桥梁工程中,路基的沉陷、崩塌、滑坡、排水,桥梁、涵洞等的修建都与流体力学密切相关;在给排水工程中,给排水系统的设计、运行和控制有赖于流体力学;在建筑环境与设备工程中,供热、通风、空调设计和设备选用也有赖于流体力学。综上所述,流体力学这一学科在人们的生产和生活中发挥着至关重要的作用。

可以说,流体力学是流体工程、流体机械、热能、建筑、环保、航海、宇航、兵器、化工、冶金、水利、发电、石油、采矿、农林、轻工、气象、纺织、生物工程等专业重要的专业基础理论课,更是市政工程、环境工程、土木工程、道路和桥梁工程等专业的基础。

1.2 常用的流体力学模型

流体力学模型是对所研究实际流体的物理结构和物理性质进行科学的结合和实际的简化,以便推导出代表流体运动规律的数学表达式。最基本的流体力学模型是连续介质力学

模型,常用的还有不可压缩流体力学模型和理想流体力学模型。

1.2.1 流体的连续介质力学模型

从微观角度看,流体是由大量的分子构成的,分子都在做无规则的热运动,分子间是离散的,存在空隙,流体的物理量(如密度、压强和速度等)在空间的分布是不连续的。又由于分子运动具有随机性,在空间任一点,流体的物理量随时间的变化也是不连续的。因此,以分子作为流动的基本单元来研究流体的运动是非常困难的。

现代物理学的研究表明:在标准状态下, 1cm^3 水中大约有 3.3×10^{22} 个水分子,相邻分子间的距离约为 $3 \times 10^{-8}\text{cm}$; 1cm^3 气体大约有 2.7×10^{19} 个分子,相邻分子间的距离约为 $3.2 \times 10^{-7}\text{cm}$ 。可见,流体分子间的距离非常微小,很小的体积中包含有大量的分子。

在一般工程中,所研究流体的空间比分子尺寸大得多,而且要解决的工程问题是流体大量分子运动的统计平均特性,即流体的宏观运动,而不是微观运动。

基于以上原因,流体力学中把流体看作由无数连续分布的流体质点组成的连续介质,这就是流体的连续介质模型,是 1753 年由瑞士物理学家欧拉首先提出的。“连续介质模型”认为,流体是充满所占据的空间且质点间不留任何间隙(没有真空的地方,也没有分子间的间隙)的连续体。连续介质模型对流体的物质结构进行了简化,是最基本的、贯穿流体力学始终的力学模型。

连续介质模型具有下列性质:

(1) 流体是连续分布的物质,它可以被无限分割为具有均匀质量的宏观微元体。这个微元体在宏观上无限小,体积 ΔV 接近于 0。作为空间的一点,微观上无限大,其内部包含着大量分子(如 1cm^3 气体包含 2.69×10^{19} 个分子),满足数学统计平均量,具有宏观属性。

(2) 在不发生化学反应和离解等非平衡过程的运动流体中,微元体内状态服从热力学关系。

(3) 除了特殊面,流体的力学和热力学状态参数在时空中是连续分布的,并且通常是无限可微的。

1.2.2 不可压缩流体的力学模型

对于液体和马赫数 $Ma < 0.3$ 的低速气流,可忽略流体的压缩性和热胀性,认为其体积(或密度)是不变的,这称为不可压缩流体力学模型。

在大多数情况下(水击等问题除外),可以忽略液体压缩性的影响,认为流体密度 ρ 为常数,使问题得到简化。

1.2.3 理想流体力学模型

所谓理想流体,就是不考虑黏性作用的流体,这种模型叫做理想流体力学模型,它是对流体的物理性质进行简化。1775 年欧拉在他的著作《流体运动的一般原理》中首先提出理想流体的概念,并建立了理想流体运动微方程——欧拉运动微分方程。

实际上,流体都是具有黏性的,都是黏性流体。理想流体是客观世界上并不存在的一种

流体。理想流体力学模型的意义在于以下几点:

(1) 在实际流体的黏性作用表现不出来的场合(如静止流体或匀速流动的流体中),或在黏性不起主要作用的流动问题中,可以先不计黏性的影响,把实际流体当作理想流体来处理,使问题的分析大为简化,从而有利于掌握流体流动的基本规律。如水波在河中传播时,在较长的距离上仍不消衰;大气在高空中运动时,长驱直入,常常跨越数千公里,这表明在这类流动中,黏性并不起主要作用,因此将其黏性略去,便可以简化分析,且能得到其主要的运动规律。至于黏性的影响,则可根据实验引入必要的修正系数,并对理想流体得出的流动规律加以修正。

(2) 在许多场合,计算黏性流体流动的精确解是很困难的。研究流体理论方程时,不考虑难以计算的黏性项,可使问题大大简化。即使对于黏性为主要影响因素的实际流动问题,也可先研究不计黏性影响的理想流体的流动,再引入黏性影响,研究黏性流体更为复杂的情况,这也符合认识事物时由简到繁的规律。

基于以上原因,在流体力学中,总是先研究理想流体的流动,再研究黏性流体的流动。由理想流体流动模型形成的水力学理论,在解释很多实际问题时都起到了重要的作用,但它不能解释物体在流体中运动的阻力及管道和渠道中压力等重要问题。对于这类问题,理想流体流动模型与实际流体有较大差距。

1.3 分析流体力学的理论基础

自然界中所存在的一切物质的运动,毫无例外地都遵循着质量守恒定律和能量守恒定律这两个基本定律。因此,流体运动也必然遵守这些定律。流体力学研究的是流体的宏观机械运动,所以必然遵守牛顿力学定律。故而,分析流体力学的理论基础如下:

- (1) 质量守恒定律(连续性方程);
- (2) 能量守恒定律——热力学第一定律(能量方程);
- (3) 牛顿运动第二定律(可导出动量守恒定理、动量矩守恒定理、动能定理等)。

上述定律既不以所讨论的实际流体的性质为转移,又与所考虑的具体流动过程无关,一切流体或运动形式都必须遵循。只要把上述定律应用于运动流体,并考虑到流体具有易流动性(变形)的特点,就能得到流体力学的基本规律。再附加以流动的初始条件和流动区域的边界条件,就可以确定一个特殊的流动问题。

1.4 作用在流体上的力

一切流体只有在力(外力)的作用下,才能产生一定的运动状态(包括静止在内)。外力是流体产生机械运动的外因,流体自身的特性是运动状态的内因。因此,流体在做机械运动时,流体内部各个质点之间必以一定的应力相互作用着。流体力学主要研究作用在流体上的力与其运动状态的关系。