



智慧图书·建筑书系

全国土木工程类实用创新型规划教材

主审/胡兴福
主编/李超

流体力学

FLUID MECHANICS

哈尔滨工业大学出版社





智能图书·建筑书系

全国土木工程类实用创新型规划教材

流体力学

FLUID MECHANICS

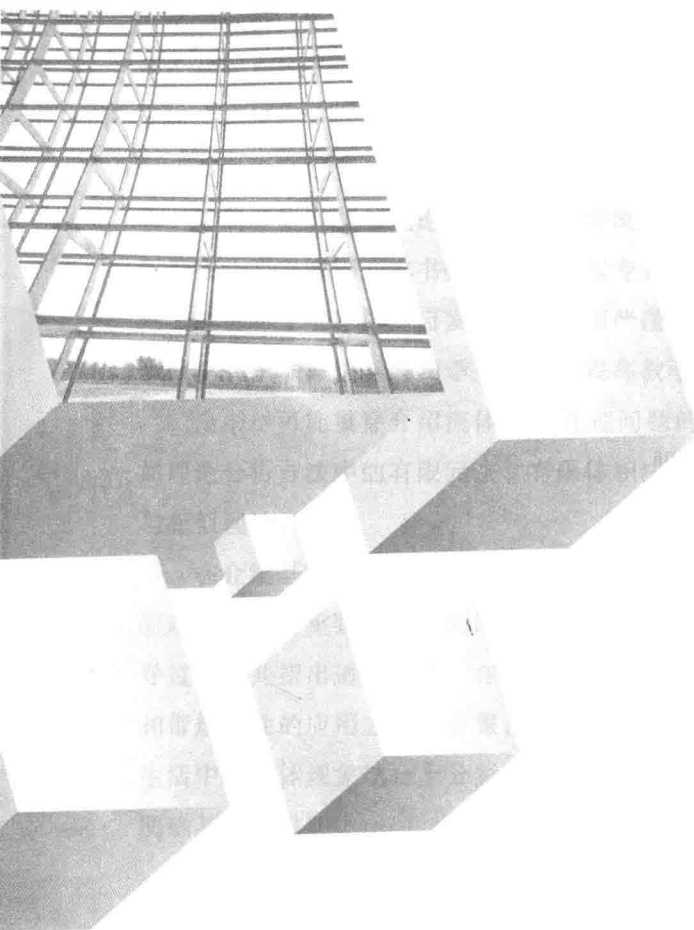
主审 胡兴福

主编 李超

副主编 张岩 吕东梅 董丽 王飞腾

王新文 刘敏 姚洪文

编者 杨国丽 岳建军 郝彩侠 李建凤



哈尔滨工业大学出版社



内 容 简 介

本教材是全国土木工程类实用创新型规划教材之一,是土木工程专业流体力学课程(40~50学时)教材。

全书共分九个模块,主要内容有:绪论、流体静力学、液体运动学、流体动力学、量纲分析和相似理论、恒定平面势流、流动阻力和水头损失、有压管流、明渠流。本书针对土木工程专业的课程特点,注意加强理论基础和对学生思维的启发,论述简明严谨,引入国外先进的流体理论,便于教学。

本书可作为市政、环境、水利、机械各专业流体力学(水力学)课程教学用书和辅导材料,也可作为全国各种执业资格(注册结构师、注册设备师、注册电气工程师等)考试流体力学部分的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

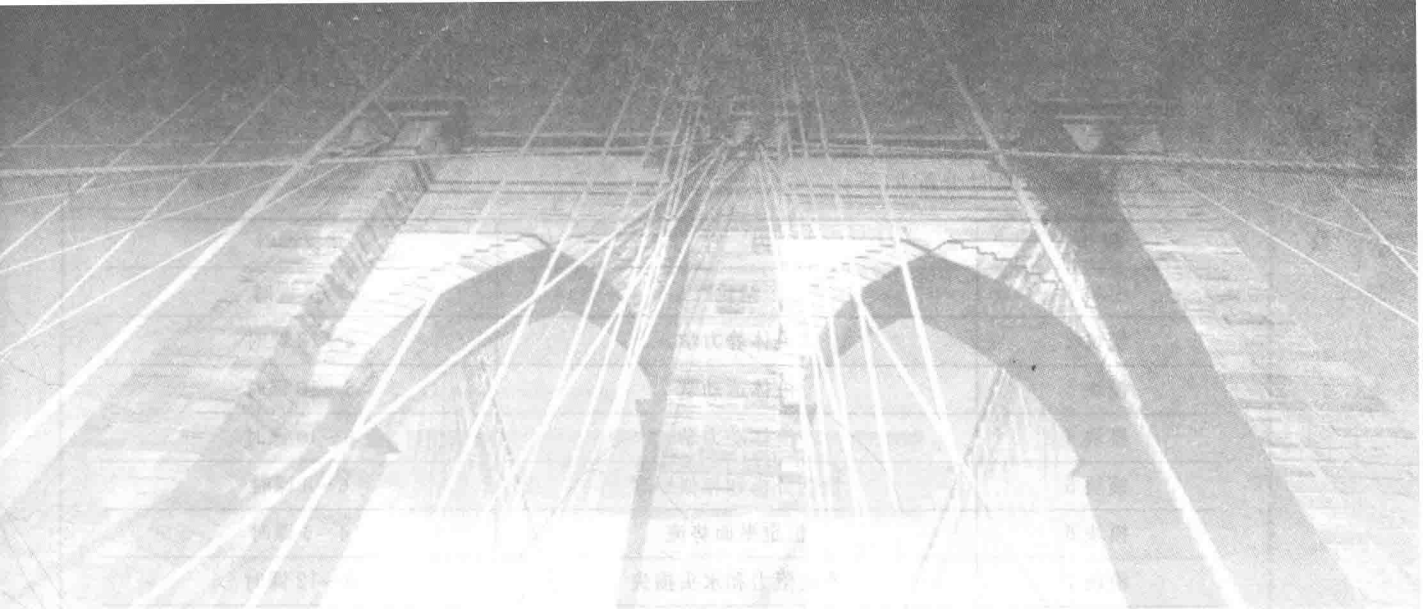
流体力学/李超主编. —哈尔滨:哈尔滨
工业大学出版社,2014.6
ISBN 978-7-5603-4680-9

I. ①流… II. ①李… III. ①流体力学-高等学校
教材 IV. ①O35

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 086982 号

责任编辑 李广鑫
出版发行 哈尔滨工业大学出版社
社 址 哈尔滨市南岗区复华四道街 10 号 邮编 150006
传 真 0451-86414749
网 址 <http://hitpress.hit.edu.cn>
印 刷 天津市蓟县宏图印务有限公司
开 本 850mm×1168mm 1/16 印张 12.5 字数 377 千字
版 次 2014 年 6 月第 1 版 2014 年 6 月第 1 次印刷
书 号 ISBN 978-7-5603-4680-9
定 价 27.00 元

(如因印装质量问题影响阅读,我社负责调换)



本书是全国土木工程类实用创新型规划系列教材之一，是土木工程专业及流体力学课程教材，也可作为市政、环境、水利、机械等专业流体力学（水力学）教学用书或辅导材料，以及全国各类职业资格考试（注册结构师、注册设备师、注册电气工程师等）流体力学内容的辅导资料。本书内容适应当代科学技术发展的需要，注重加强学生理论基础和实践能力的培养，力求贯彻理论联系实际，知识与能力辩证统一的原则。

本书内容主要包括：绪论、流体静力学、流动运动学、流体动力学、量纲分析和相似理论、恒定平面势流、流动阻力和水头损失、有压管流、明渠流等。本书针对土木工程专业的特点，注意加强理论基础，注重对学生思维的启发，论述简明严谨，引入国外先进的流体力学教学理念和方法，开阔学生视野，提高教学效果。

全书尽可能贯穿介绍流体力学处理问题的基本方法和常用方法，如理论分析方法中的有限元法、有限体积法和实验方法中的量纲分析与相似理论。

在介绍基本概念时，力求严格、确切、形象、清晰；在介绍基本原理时，既着重物理观点的阐述，又对必要的数学处理给予扼要的推导过程，并指出适用条件；在介绍基本理论应用时，提出关键、要点和带规律性的应用方法、步骤；同时，本书中所选的例题、练习题与生活中的流体现象结合十分紧密。使学生在了解水力现象的同时，更明确其机理过程。

Preface

前言

本课程整体课时分配如下：

模块	内 容	建议课时
模块 1	绪论	6~8 课时
模块 2	流体静力学	8~12 课时
模块 3	液体运动学	6~10 课时
模块 4	流体动力学	8~10 课时
模块 5	量纲分析和相似原理	6~8 课时
模块 6	恒定平面势流	4~6 课时
模块 7	流动阻力和水头损失	8~12 课时
模块 8	有压管流	8~10 课时
模块 9	明渠流	6~8 课时

在编写过程中，得到校内外有关同仁和专家的热情鼓励和支持，吸收了他们许多宝贵的经验、意见和建议。在此一并致以衷心的感谢！

限于编者水平，同时编写时间也比较仓促，因而恳请广大读者对教材中的疏漏和不足给予谅解和指正。

编 者

编 审 委 员 会

主 任:胡兴福

副主任:李宏魁 符里刚

委 员:(排名不分先后)

胡 勇	赵国忱	游普元
宋智河	程玉兰	史增录
张连忠	罗向荣	刘尊明
胡 可	余 斌	李仙兰
唐丽萍	曹林同	刘吉新
武鲜花	曹孝柏	郑 睿
常 青	王 斌	白 蓉
张贵良	关 瑞	田树涛
吕宗斌	付春松	蒙绍国
莫荣锋	赵建军	易 斌
程 波	王右军	谭翠萍
边喜龙		

• • 本书学习导航 • •

简要介绍本模块与整个工程项目的联系，在工程项目中的意义，或者与工程建设之间的关系等。

模块概述

包括知识目标和技能目标，列出了学生应了解与掌握的知识点。

学习目标

课时建议

建议课时，供教师参考。

技术提示

言简意赅地总结实际工作中容易犯的错误或者难点、要点等。

重点串联

用结构图将整个模块的重点内容贯穿起来，给学生完整的模块概念和思路，便于复习总结。

拓展与实训

包括职业能力训练、工程模拟训练和链接执业三部分，从不同角度考核学生对知识的掌握程度。

各模块开篇前导入实际工程，简要介绍工程项目中与本模块有关的知识及与整个工程项目的联系及在工程项目中的意义，或者课程内容与工程需求的关系等。

工程导入

模块 1 绪论

【模块概述】
绪论是本书的开篇，主要介绍本书的编写目的、适用范围、主要特点、主要章节、主要符号、主要单位、主要公式、主要图表、主要参考文献等。通过绪论的学习，使学生了解本书的编写目的、适用范围、主要特点、主要章节、主要符号、主要单位、主要公式、主要图表、主要参考文献等，为后续章节的学习做好铺垫。

【学习目标】
1. 了解本书的编写目的、适用范围、主要特点、主要章节、主要符号、主要单位、主要公式、主要图表、主要参考文献等。
2. 了解本书的编写目的、适用范围、主要特点、主要章节、主要符号、主要单位、主要公式、主要图表、主要参考文献等。

【课时建议】
1. 绪论 1 课时

2.1 静水压强的概念

【知识目标】

1. 理解静水压强的概念。
2. 理解静水压强的特性。
3. 理解静水压强的分布规律。

【能力目标】
1. 能够根据静水压强的概念，分析静水压强的分布规律。
2. 能够根据静水压强的特性，分析静水压强的分布规律。

【素质目标】
1. 培养学生严谨的科学态度和实事求是的精神。

【拓展与实训】
1. 静水压强的分布规律。

2. 静水压强的分布规律。

3. 静水压强的分布规律。

4. 静水压强的分布规律。

5. 静水压强的分布规律。

6. 静水压强的分布规律。

7. 静水压强的分布规律。

8. 静水压强的分布规律。

9. 静水压强的分布规律。

10. 静水压强的分布规律。

11. 静水压强的分布规律。

12. 静水压强的分布规律。

13. 静水压强的分布规律。

14. 静水压强的分布规律。

15. 静水压强的分布规律。

16. 静水压强的分布规律。

17. 静水压强的分布规律。

18. 静水压强的分布规律。

19. 静水压强的分布规律。

20. 静水压强的分布规律。

21. 静水压强的分布规律。

22. 静水压强的分布规律。

23. 静水压强的分布规律。

24. 静水压强的分布规律。

25. 静水压强的分布规律。

26. 静水压强的分布规律。

27. 静水压强的分布规律。

28. 静水压强的分布规律。

29. 静水压强的分布规律。

30. 静水压强的分布规律。

31. 静水压强的分布规律。

32. 静水压强的分布规律。

33. 静水压强的分布规律。

34. 静水压强的分布规律。

35. 静水压强的分布规律。

36. 静水压强的分布规律。

37. 静水压强的分布规律。

38. 静水压强的分布规律。

39. 静水压强的分布规律。

40. 静水压强的分布规律。

模块 1 绪论

模块概述/001

知识目标/001

技能目标/001

学习重点/001

课时建议/001

1.1 流体力学的任务及发展简史/002

1.1.1 流体力学概念/002

1.1.2 流体力学的发展历史/002

1.1.3 流体力学的应用/004

1.2 流体的连续介质模型/005

1.2.1 流体的特征/005

1.2.2 连续介质的概念/005

1.3 流体的主要物理性质/007

1.3.1 密度和容重/007

1.3.2 粘性/007

1.3.3 压缩性和不可压缩液体模型/009

1.3.4 表面张力/010

1.4 作用于流体上的力/011

1.4.1 表面力/011

1.4.2 质量力/011

1.5 流体力学的研究方法与发展展望/012

1.5.1 流体力学的研究方法/012

1.5.2 流体力学的发展展望/013

❖重点串联/014

❖拓展与实训/014

❖职业能力训练/014

❖工程模拟训练/015

❖链接执考/015

模块 2 流体静力学

模块概述/016

知识目标/016

技能目标/016

学习重点/016

课时建议/016

工程导入/017

2.1 静水压强的概念/017

2.1.1 静水压强的定义/017

2.1.2 静水压强的特性/017

2.2 液体的平衡微分方程与等压面/018

2.2.1 液体的平衡微分方程/018

2.2.2 液体平衡微分方程的积分/019

2.2.3 帕斯卡定律/020

2.2.4 等压面/021

2.3 重力作用下静水压强的分布规律/021

2.3.1 重力作用下静水压强的基本公式/021

2.3.2 压强的度量/022

2.4 重力和惯性力同时作用下的液体平衡/025

2.5 平面上的静水总压力/027

2.5.1 解析法/027

2.5.2 图解法/030

2.6 曲面上的静水总压力/032

2.6.1 压力大小/033

2.6.2 压力体/033

2.6.3 总压力的方向和作用点/034

2.7 潜体与浮体的平衡与稳定性/036

2.7.1 物体的沉浮/036

2.7.2 潜体的平衡及稳定性/036

2.7.3 浮体的平衡及稳定性/037

❖重点串联/038

❖拓展与实训/039

❖职业能力训练/039

❖工程模拟训练/040

❖链接执考/041

模块 3 液体运动学

模块概述/043

知识目标/043

技能目标/043

学习重点/043

课时建议/043

工程导入/044

3.1 描述液体运动的两种方法/044

3.1.1 拉格朗日法/044

3.1.2 欧拉法/045

3.2 液体运动的基本概念/047

3.2.1 恒定流与非恒定流/047

3.2.2 流线、迹线及其微分方程/047

3.2.3 流面、流管、元流、总流/050

3.2.4 过水断面、流量、断面平均流速/050

3.3 液体运动的类型/052

3.3.1 一维流、二维流、三维流/052

3.3.2 均匀流和非均匀流/052

3.3.3 渐变流和急变流/053

3.3.4 有压流、无压流、射流/054

3.4 连续性方程/054

3.4.1 控制体的概念/054

3.4.2 液体运动的连续性微分方程/054

3.4.3 恒定总流的连续性方程/056

3.5 液体微团的运动分析/058

3.5.1 速度分解定理/058

3.5.2 速度分解的物理意义/058

❖重点串联/061

❖拓展与实训/061

✱职业能力训练/061

✱工程模拟训练/062

✱链接执考/062

模块4 流体动力学

模块概述/063

知识目标/063

技能目标/063

学习重点/063

课时建议/063

工程导入/064

4.1 雷诺输运定理/064

4.2 热力学第一定律——能量方程/065

4.2.1 积分形式的能量方程/065

4.2.2 沿流线的伯努利方程/066

4.2.3 粘性流体总流的伯努利方程/067

4.2.4 伯努利方程水力学意义/069

4.3 牛顿第二定律——动量方程/071

4.4 流体力学方程的应用/072

4.4.1 连续性方程的应用/072

4.4.2 能量方程的应用/072

4.4.3 动量方程的应用/077

❖重点串联/078

❖拓展与实训/079

✱职业能力训练/079

✱工程模拟训练/081

✱链接执考/081

模块5 量纲分析和相似原理

模块概述/083

知识目标/083

技能目标/083

学习重点/083

课时建议/083

5.1 量纲分析概念和原理/084

5.1.1 物理量的单位和量纲/084

5.1.2 无量纲量/084

5.1.3 物理方程的量纲一致性/085

5.2 量纲分析方法/086

5.2.1 瑞利法/086

5.2.2 π 定理/087

5.3 流动相似原理/089

5.3.1 几何相似/089

5.3.2 运动相似/089

5.3.3 动力相似/090

5.3.4 初始条件和边界条件相似/090

5.4 相似准则/090

5.4.1 雷诺准则/091

5.4.2 弗劳德准则/091

5.4.3 欧拉准则/092

5.4.4 常用的相似准则的物理意义/092

5.5 流体力学模型试验/093

5.5.1 模型律的选择/093

5.5.2 模型设计/094

❖重点串联/096

❖拓展与实训/097

✱职业能力训练/097

✱工程模拟训练/097

✱链接执考/098

模块6 恒定平面势流

模块概述/099

知识目标/099

技能目标/099

学习重点/099

课时建议/099

工程导入/100

6.1 速度势/100

6.2 流函数/101

6.3 几种简单的平面势流/102

6.3.1 均匀流/103

6.3.2 源流和汇流/104

6.3.3 环流/105

6.3.4 偶极流/108

6.4 简单平面势流叠加/109

6.4.1 源流和均匀流的叠加/109

6.4.2 均匀流和偶极流的叠加——圆柱绕流/112

✧重点串联/116

✧知识链接/117

✧拓展与实训/117

✱职业能力训练/117

✱工程模拟训练/118

模块7 流动阻力和水头损失

模块概述/119

知识目标/119

技能目标/119

学习重点/119

课时建议/119

7.1 流动阻力和水头损失的关系/120

7.1.1 水头损失的分类/120

7.1.2 水头损失的计算公式/120

7.1.3 液流边界几何条件对水头损失的影响/121

7.2 粘性流体的两种流动形态/122

7.2.1 雷诺试验/122

7.2.2 水流流动形态和水头损失关系/123

7.2.3 水流形态的判别——雷诺数/124

7.2.4 雷诺数的物理意义/125

7.3 沿程水头损失与剪应力的关系/126

7.3.1 均匀流基本方程/126

7.3.2 圆管均匀流切应力的分布/127

7.3.3 壁剪切速度/128

7.4 圆管中层流运动/128

7.4.1 圆管中层流运动的流动特征及流速分布/128

7.4.2 圆管中层流运动的流量/129

7.4.3 断面平均流速/129

7.4.4 动能修正系数和动量修正系数/129

7.4.5 圆管层流的沿程阻力损失/130

7.5 紊流运动/130

7.5.1 紊流的形成过程/130

7.5.2 紊流的特征与时均化/131

7.5.3 粘性底层/133

7.5.4 混合长度理论/133

7.6 非圆管的沿程损失/135

7.6.1 水力半径/135

7.6.2 当量直径/135

7.7 局部损失/136

7.7.1 局部损失的一般分析/137

7.7.2 变管径的局部损失/138

7.7.3 弯管的局部损失/139

7.7.4 局部阻力之间的相互干扰/140

7.8 减小阻力的措施/140

✧重点串联/141

✧拓展与实训/142

✱职业能力训练/142

✱工程模拟训练/143

✱链接执考/143

模块8 有压管流

模块概述/144

知识目标/144

技能目标/144

学习重点/144

课时建议/144

工程导入/145

8.1 短管的水力计算/145

8.1.1 自由出流/145

8.1.2 淹没出流/146

8.1.3 短管水力计算的问题/148

8.1.4 短管水力计算的应用/148

8.1.5 短管管道系统水头线的绘制/150

8.2 长管的水力计算/151

8.2.1 按比阻计算/151

8.2.2 按水力坡度计算/153

8.3 复杂管道的水力计算/155

8.3.1 串联管道/155

8.3.2 并联管道/156

8.3.3 沿程均匀泄流管道/157

8.4 管网水力计算基础/159

8.4.1 枝状管网/159

8.4.2 环状管网/161

8.5 有压管道的水击/161

8.5.1 水击现象/161

8.5.2 水击的传播过程/162

8.5.3 水击压强的计算/163

8.5.4 水击危害的预防/164

❖重点串联/165

❖知识链接/165

❖拓展与实训/165

✱职业能力训练/165

✱工程模拟训练/166

✱链接执考/167

模块9 明渠流

模块概述/169

知识目标/169

技能目标/169

学习重点/169

课时建议/169

工程导入/170

9.1 明渠水流的一般特性/170

9.2 表面波/170

9.2.1 波速/171

9.2.2 弗劳德数 Fr 的影响/172

9.3 断面比能/172

9.4 明渠均匀流/173

9.4.1 过流断面的几何要素/173

9.4.2 明渠均匀流特性及条件/174

9.4.3 明渠均匀流的计算公式/174

9.4.4 水力最佳断面/176

9.5 渐变流/178

9.6 急变流/178

9.6.1 水跃/178

9.6.2 薄壁堰/181

9.6.3 宽顶堰/183

9.6.4 闸孔出流/186

❖重点串联/187

❖知识链接/187

❖拓展与实训/188

✱职业能力训练/188

✱工程模拟训练/188

✱链接执考/189

参考文献/190

模块

1

绪论

【模块概述】

在气象、水利的研究，船舶、飞行器、叶轮机械和核电站的设计及其运行，可燃气体或炸药的爆炸，汽车制造（联众集群），以及天体物理的若干问题中，都广泛地用到流体力学知识。许多现代科学技术所涉及的问题都与流体力学息息相关，同时，也促进了流体力学的不断发展。

本模块以基本概念为主，主要介绍流体的物理性质、牛顿内摩擦定律及作用在流体上的力，其中粘滞性在后续很多内容中都有所应用，还论述了流体力学的研究方法以更好地指导工程中流体力学的研究和应用。

【知识目标】

1. 流体力学的概念和发展简史及其在工程中的应用。
2. 流体连续介质概念。
3. 流体主要物理性质的概念和计算，牛顿内摩擦定律。
4. 作用在流体上的力分析。
5. 流体力学的主要研究方法。

【技能目标】

1. 清楚流体力学的发展简史。
2. 熟悉流体的主要物理量。
3. 掌握流体的牛顿内摩擦定律。
4. 掌握作用在流体上的力。
5. 了解流体力学的研究方法。

【学习重点】

流体主要的物理性质、牛顿内摩擦定律。

【课时建议】

6~8 课时



1.1 流体力学的任务及发展简史

1.1.1 流体力学概念

流体力学是力学的一个独立分支,主要研究流体本身的静止状态和运动状态,以及流体和固体界壁间有相对运动时的相互作用和流动的规律。

在一定的外界条件下,根据组成物质的分子间距离和相互作用力强弱的不同,将物质划分为固体、液体和气体,而根据物质的受力和运动特性的不同,物质又可划分为固体和流体。流体包括液体和气体。固体既能承受法向力(包括压力和拉力),又能承受切向力,在弹性范围内作用力使固体产生有限的变形,作用力消失,变形消失,固体恢复到原来的形状;流体只能承受压力,不能承受拉力,在静止流体中只要有切向力的作用,不管它多么小,在足够长的时间内流体将产生连续不断的变形。这种变形就是我们所说的流动。因此,也称能流动的物质为流体。水、空气、酒精、润滑油等是常见的流体。

流体力学是力学的一个分支,属于宏观力学。它的主要任务是研究流体所遵循的宏观运动规律以及流体和周围物体之间的相互作用。有些物质具有流体和固体的双重特性。例如,我们熟知的沥青,块状沥青表现为固体,而经长时间载荷作用下的沥青又具有流体的特性。又如面团也有固体和流体的双重特性,我们把这类物体统称为粘弹性流体。流体力学不讨论这种具有双重性的物质,只讨论像水、空气这样的“纯粹流体”。液体和气体虽同为流体,具有共性,但又各有特性。液体虽无一定的形状,但具有一定的体积,不易被压缩,在与气体的交界面上存在自由表面;气体既没有一定的形状,也没有一定的体积,易于被压缩,不存在自由表面。液体和气体的特性决定了各自需要研究的特殊问题。以液体为主要研究对象的力学称为水动力学(Hydrodynamics),以空气为主要研究对象的力学称为气动力学(Aerodynamics),两者结合起来统称为流体力学(Fluid Mechanics)。例如,由于液体存在自由表面,舰船在水面上航行时会引起船波,需要研究波浪问题而不计压缩性,如果舰船在汹涌起伏的水面上(波浪中)航行,还会发生摇摆和击水等现象;由于气体的易压缩性,飞机、导弹等在空中高速航行时要考虑压缩性和冲击波等问题。但是,如果研究距水面较远的深水问题,水面的影响可不予考虑,而研究低速流动的空气时,也可以不考虑压缩性,这时,水和空气遵循大致相同的运动规律。例如,空气中的气球和深水下的水雷,空气中的飞船和水下的水滴形潜艇等的受力情况是类似的。

研究对象:主要是空气和水。

研究内容:流体静力学和流体动力学。

(1) 流体静力学:关于流体平衡的规律,研究流体处于静止(或相对平衡)状态时,作用于流体上的各种力之间的关系。

(2) 流体动力学:关于流体运动的规律,研究流体在运动状态时,作用于流体上的力与运动要素之间的关系,以及流体的运动特征与能量转换等。

研究所需的知识基础:主要是牛顿运动定律和质量守恒定律,常常还要用到热力学知识,有时还用到宏观电动力学的基本定律、本构方程(反映物质宏观性质的数学模型)和物理学、化学的基础知识。

1.1.2 流体力学的发展历史

流体力学是在人类同自然界作斗争和在生产实践中逐步发展起来的。古代中国有大禹治水疏通江河的传说;秦朝李冰父子带领劳动人民修建的都江堰,至今还在发挥着作用;大约与此同时,古

罗马人建成了大规模的供水管道系统等。

1. 流体力学的萌芽

距今约 2 200 年前, 希腊学者阿基米德写的《论浮体》一文, 对静止时的液体力学性质作了第一次科学的总结。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。此后的千余年间, 流体力学没有重大发展。

15 世纪, 意大利达·芬奇的著作中才谈到水波、管流、水力机械、鸟的飞翔原理等问题; 17 世纪, 帕斯卡阐明了静止流体中压力的概念。但流体力学尤其是流体动力学作为一门严密的科学, 却是随着经典力学建立了速度、加速度、力、流场等概念, 以及质量、动量、能量三个守恒定律的奠定之后才逐步形成的。

2. 流体力学的主要发展

17 世纪, 力学奠基人牛顿在名著《自然哲学的数学原理》(1687 年) 中讨论了在流体中运动的物体所受到的阻力, 得到阻力与流体密度、物体迎流截面积以及运动速度的平方成正比的关系。他针对粘性流体运动时的内摩擦力也提出了牛顿内摩擦定律。使流体力学开始成为力学中的一个独立分支。但是, 牛顿还没有建立起流体动力学的理论基础, 他提出的许多力学模型和结论同实际情形还有较大的差别。

之后, 皮托发明了测量流速的皮托管; 达朗贝尔对运动中船只的阻力进行了许多实验工作, 证实了阻力同物体运动速度之间的平方关系; 欧拉采用了连续介质的概念, 把静力学中压力的概念推广到运动流体中, 建立了欧拉方程, 正确地用微分方程组描述了无粘流体的运动; 伯努利从经典力学的能量守恒出发, 研究供水管道中水的流动, 精心地安排了实验并加以分析, 得到了流体定常运动下的流速、压力、管道高程之间的关系——伯努利方程。

欧拉方程和伯努利方程的建立, 是流体动力学作为一个分支学科建立的标志, 从此开始了用微分方程和实验测量进行流体运动定量研究的阶段。从 18 世纪起, 位势流理论有了很大进展, 在水波、潮汐、涡旋运动、声学等方面都阐明了很多规律。拉格朗日对于无旋运动, 德国赫尔姆霍兹对于涡旋运动做了不少研究。在上述研究中, 流体的粘性并不起重要作用, 即所考虑的是无粘性流体。这种理论当然阐明不了流体中粘性的效应。

19 世纪, 工程师们为了解决许多工程问题, 尤其是要解决带有粘性影响的问题, 他们部分地运用流体力学, 部分地采用归纳实验结果的半经验公式进行研究, 这就形成了水力学, 至今它仍与流体力学并行地发展。1822 年, 纳维建立了粘性流体的基本运动方程; 1845 年, 斯托克斯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), 它是流体动力学的理论基础。上面说到的欧拉方程正是 N-S 方程在粘度为零时的特例。

普朗克学派从 1904~1921 年逐步将 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, 能实际计算简单情形下, 边界层内流动状态和流体同固体间的粘性力。同时普朗克又提出了许多新概念, 并广泛地应用到飞机和汽轮机的设计中去。这一理论既明确了理想流体的适用范围, 又能计算物体运动时遇到的摩擦阻力。使上述两种情况得到了统一。

20 世纪初, 飞机的出现极大地促进了空气动力学的发展。航空事业的发展, 期望能够揭示飞行器周围的压力分布、飞行器的受力状况和阻力等问题, 这就促进了流体力学在实验和理论分析方面的发展。20 世纪初, 以儒科夫斯基、恰普雷金、普朗克等为代表的科学家, 开创了以无粘不可压缩流体位势流理论为基础的机翼理论, 阐明了机翼怎样会受到举力, 从而空气能把很重的飞机托上天空。机翼理论的正确性, 使人们重新认识无粘流体的理论, 肯定了它指导工程设计的重大意义。

机翼理论和边界层理论的建立和发展是流体力学的一次重大进展, 它使无粘流体理论同粘性流体的边界层理论很好地结合起来。随着汽轮机的完善和飞机飞行速度提高到 50 m/s 以上, 又迅速

扩展了从 19 世纪就开始的,对空气密度变化效应的实验和理论研究,为高速飞行提供了理论指导。20 世纪 40 年代以后,由于喷气推进和火箭技术的应用,飞行器速度超过声速,进而实现了航天飞行,使气体高速流动的研究进展迅速,形成了气体动力学、物理—化学流体动力学等分支学科。

以这些理论为基础,20 世纪 40 年代,关于炸药或天然气等介质中发生的爆轰波又形成了新的理论,为研究原子弹、炸药等起爆后,激波在空气或水中的传播,发展了爆炸波理论。此后,流体力学又发展了许多分支,如高超声速空气动力学、超声速空气动力学、稀薄空气动力学、电磁流体力学、计算流体力学、两相(气液或气固)流等。

这些巨大进展是和采用各种数学分析方法和建立大型、精密的实验设备和仪器等研究手段分不开的。从 20 世纪 50 年代起,电子计算机不断完善,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。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了很大的进展。

20 世纪 60 年代,根据结构力学和固体力学的需要,出现了计算弹性力学问题的有限元法。经过十多年的发展,有限元分析这项新的计算方法又开始在流体力学中应用,尤其是在低速流和流体边界形状甚为复杂的问题中,优越性更加显著。近年来又开始了用有限元法研究高速流的问题,也出现了有限元法和差分法的互相渗透和融合。

从 20 世纪 60 年代起,流体力学开始了与其他学科的互相交叉渗透,形成新的交叉学科或边缘学科,如物理—化学流体动力学、磁流体力学等;原来基本上只是定性地描述的问题,逐步得到定量的研究。

在我国,水利事业的历史十分悠久:4 000 多年前的“大禹治水”的故事——顺水之性,治水须引导和疏通;秦朝在公元前 256 至公元前 210 年修建了我国历史上的三大水利工程都江堰、郑国渠、灵渠——明渠水流、堰流;古代的计时工具“铜壶滴漏”——孔口出流;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;隋朝(587—610 年)完成的南北大运河;隋朝工匠李春在冀中洺河修建(605—617 年)的赵州石拱桥——拱背的 4 个小拱,既减压主拱的负载,又可宣泄洪水。

1.1.3 流体力学的应用

1. 课程的性质与目的

性质:流体力学是研究流体机械运动规律及其应用的学科,是一门必修的专业基础课程。研究对象以水为主体,涉及气体与可压缩流体。

研究内容:机械运动规律和工程应用。

通过各教学环节,使学生掌握流体运动的基本概念、基本理论、基本计算方法与实验技能,培养分析问题的能力和创新能力,为学习专业课程,并为将来从事专业技术工作打下基础。为水污染控制工程、大气污染控制工程、环境工程设计等多门专业课程阐释所涉及的流体力学原理,以达到以下目的:

- 素质教育——“力学文化”“水文化”的学习;
- 研究生入学考试:工程流体力学(水力学)往往成为研究生入学考试中的专业基础课之一。

2. 流体力学的应用

流体是人类生活和生产中经常遇到的物质形式,因此许多科学技术部门都和流体力学有关。例如水利工程、土木建筑、交通运输、机械制造、石油开采、化学工业、生物工程等都有大量的流体问题需要应用流体力学的知识来解决,事实上,目前很难找到与流体力学无关的专业和学科。

(1) 流体力学已广泛用于土木工程的各个领域,如基坑排水、路基排水、地下水渗透、地基坑渗稳定处理、围堰修建、海洋平台在水中的浮性和抵抗外界扰动的稳定性等。

(2) 在市政工程中的应用。如桥涵孔径设计、给水排水、管网计算、泵站和水塔的设计、隧洞通风等,特别是给水排水工程中,无论取水、水处理、输配水都是在水流动过程中实现的。流体力学理论是给水排水系统设计和运行控制的理论基础。

(3) 城市防洪工程中的应用。如堤、坝的作用力与渗流问题、防洪闸坝的过流能力等。

(4) 在建筑环境与设备工程中的应用。如供热、通风与空调设计以及设备的选用等。

3. 学习本课程的基本要求

通过本课程学习应达到的基本要求是:

(1) 具有较为完整的理论基础,包括:

①掌握流体力学的基本概念。

②熟练掌握分析流体力学的总流分析方法。

③掌握流体运动能量转化和水头损失的规律。

(2) 具有对一般流动问题的分析和讨论能力,包括:

①水力荷载的计算。

②管道、渠道和堰过流能力的计算,井的渗流计算。

③水头损失的分析和计算。

(3) 掌握测量水位、压强、流速、流量的常规方法。

(4) 重点掌握:基础流体力学的基本概念、基本方程、基本应用。

4. 学习的难点与对策

(1) 新概念多、抽象、不易理解。对策——主要概念汇总表,多媒体资料辅助教学。

(2) 推演繁难。对策——分析各种推导要领,掌握通用的推导方法,理解思路,不要求对各个过程死记硬背。

(3) 偏微分方程(组)名目繁多。对策——仅要求部分掌握。重在理解物理意义、适用范围、条件及主要求解方法。



1.2 流体的连续介质模型

1.2.1 流体的特征

物质的三态:地球上物质存在的主要形式——固体、液体和气体。

流体和固体的区别:从力学分析的意义上看,在于它们对外力抵抗的能力不同。

固体:既能承受压力,也能承受拉力与抵抗拉伸变形。

流体:只能承受压力,一般不能承受拉力与抵抗拉伸变形。流体易变形,没有固定形状。

液体和气体的区别:

(1) 气体易于压缩,而液体难于压缩。

(2) 液体有一定的体积,存在一个自由液面;气体能充满任意形状的容器,无一定的体积,不存在自由液面。

液体和气体的共同点:两者均具有易流动性,即在任何微小切应力作用下都会发生变形或流动,故二者统称为流体。

气体与蒸汽的区别:蒸汽易凝结成液体,气体较难。

1.2.2 连续介质的概念

从微观角度看,流体是由大量做无规则运动的分子组成的,分子之间存在空隙。从宏观角度

看, 考虑宏观特性, 在流动空间和时间上所采用的一切特征尺度和特征时间都比分子距离和分子碰撞时间大得多。连续介质是指质点连续地充满所占空间的流体。而连续介质模型是把流体视为没有间隙地充满它所占据的整个空间的一种连续介质, 且其所有的物理量都是空间坐标和时间的连续函数的一种假设模型。

为了深入了解连续介质的概念, 现讨论某点处流体的平均密度。

如图 1.1 (a) 所示, 在流体中任取包含 $A(x, y, z)$ 的微元体积 ΔV , 设其质量为 Δm , 则平均密度为 $\frac{\Delta m}{\Delta V}$ 。图 1.1 (b) 为平均密度 $\frac{\Delta m}{\Delta V}$ 随体积 ΔV 变化的实测结果示意图。

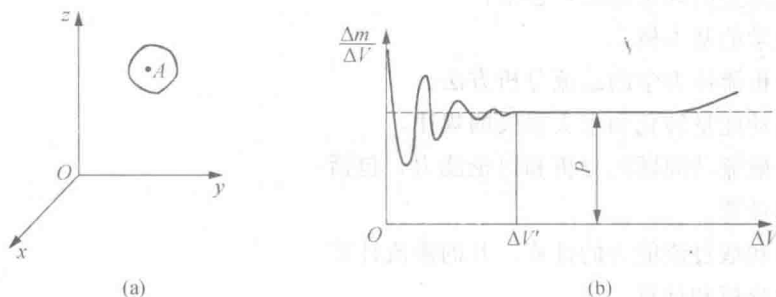


图 1.1 连续介质

如图 1.1 所示, 在体积 ΔV 由大到小变化的过程中, 平均密度逐渐趋于某一确定值 ρ , 直到体积缩小趋于一定的极限值, 这是因为 ΔV 越小, 越说明体积 ΔV 内包含足够多的分子数, 部分分子的进出不影响密度值的稳定性。当体积 ΔV 继续向 $\Delta V'$ 收缩时, 平均密度表现出随机振荡现象, 且随着 ΔV 趋于 0, 密度值波动越来越大, 表明这时 ΔV 内的分子数已不能保持平均密度值的稳定, 部分分子的进出对密度值产生影响。在 $\Delta V=0$ 的极限情况, 平均密度或为 0 (恰好位于分子的间隙) 或趋于无穷大 (恰好与某一分子重合)。可见 $\Delta V'$ 是能给出稳定平均值的最小单位。我们将 $\Delta V'$ 内所有流体分子组成的流体团称为流体点。它是宏观研究流体的最小单位。所谓连续介质假设, 物理上讲就是不考虑流体的分子结构, 把流体看成是一种在一定范围内均匀、密实而连续分布的介质, 或说流体是由连续分布的流体质点所组成的, 数学上讲就是将 $\Delta V'$ 看成一个无限小的几何点。在连续介质假设下, 所谓空间任意一“点”, 实际是指一块微小的流体团, 由此, 这一点的密度定义为

$$\rho = \lim_{\Delta V \rightarrow \Delta V'} \frac{\Delta m}{\Delta V} \quad (1.1)$$

在宏观上 $\Delta V'$ 可以视为 0, 则上式表示为

$$\rho = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta m}{\Delta V} = \frac{dm}{dV} \quad (1.2)$$

在任意时刻, 空间任意点流体质点的密度都具有确定数值, 一般可写为

$$u = u(x, y, z, t)$$

即密度是空间坐标点 $A(x, y, z)$ 和时间 t 的函数。流体的其他宏观物理量也可以类似地分析和表述。

通常情况下连续介质假设都能得到满足, 因为连续介质模型排除了分子运动的复杂性。使物理量作为时空连续函数, 可以利用连续函数这一数学工具来研究问题。但个别情况例外。如航天器在外层空间中运动时, 那里的气体十分稀薄, 分子运动的平均自由行程高达几米以上, 与航天器的尺度为同量级, 这时航天器周围气体的运动就不满足连续介质假设。