

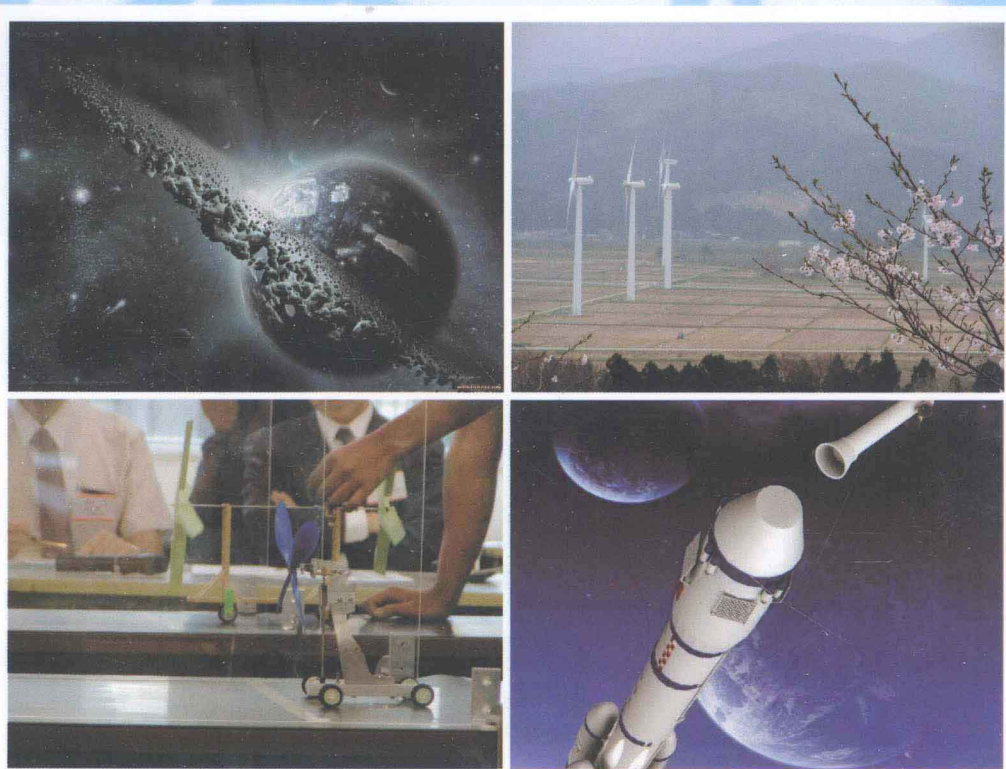


日本機械学会 JSMEテキストシリーズ 流体力学  
机械工程类专业系列教材

# 流体力学

Fluid Mechanics

(日) 日本機械学会 編  
祝宝山 张信荣 王世学 等编译



北京大学出版社  
PEKING UNIVERSITY PRESS

机械工程类专业系列教材

# 流体力学

〔日〕日本机械学会 编  
祝宝山 张信荣 王世学 等编译



北京大学出版社  
PEKING UNIVERSITY PRESS

著作权合同登记号 图字：01-2010-2473 号

图书在版编目(CIP)数据

流体力学 / (日)日本机械学会编; 祝宝山等编译. —北京: 北京大学出版社, 2013. 8  
(机械工程类专业系列教材)

ISBN 978-7-301-22542-4

I. ①流… II. ①日…②祝… III. ①流体力学 IV. ①035

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 105930 号

©日本機械学会 2005 JSMEテキストシリーズ 流体力学

原出版社の文書による許諾なくして、本書の全部または一部を、 photocopy、イメージスキャナ等により複写・複製したり、或いはデータベースへ情報として蓄積し、検索システムを含む電氣的・機械的、その他いかなる手段・形態によっても、複製したり送信したりしてはならない。

©北京大学出版社 2013 JSME 教科书系列 流体力学

本书《JSME 教科书系列 流体力学》(2005)经日本机械学会(日本·东京新宿区)的授权,由北京大学出版社编译出版。

书 名：流体力学

著作责任者：〔日〕日本机械学会 编 祝宝山 张信荣 王世学 等编译

策划编辑：胡伟晔

责任编辑：胡伟晔 (huweiye73@sina.com)

标准书号：ISBN 978-7-301-22542-4/TH·0348

出版发行：北京大学出版社

地 址：北京市海淀区成府路 205 号 100871

网 址：<http://www.pup.cn> 新浪官方微博：@北京大学出版社

电子信箱：zyjy@pup.cn

电 话：邮购部 62752015 发行部 62750672 编辑部 62765126 出版部 62754962

印 刷 者：北京大学印刷厂

889 毫米×1194 毫米 大 16 开本 14 印张 472 千字

2013 年 8 月第 1 版 2013 年 8 月第 1 次印刷

定 价：35.00 元

---

未经许可，不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有，侵权必究

举报电话：010-62752024 电子信箱：fd@pup.pku.edu.cn

能 量	功 率
J	W
erg	erg/s
kgf·m	kgf·m/s

基本单位

量的名称	SI 单位名称	SI 符号	量的名称	SI 单位名称	SI 符号
长 度	米	m	热力学温度	开[尔文]	K
质 量	千克	kg	物质的量	摩[尔]	mol
时 间	秒	s	发光强度	坎[德拉]	cd
电 流	安[培]	A			

SI 词头

因数	词头的中文名称	词头符号	因数	词头的中文名称	词头符号	因数	词头的中文名称	词头符号
10 <sup>18</sup>	艾[可萨]	E	10 <sup>2</sup>	百	h	10 <sup>-9</sup>	纳[诺]	
10 <sup>15</sup>	拍[它]	P	10 <sup>1</sup>	十	da	10 <sup>-12</sup>	皮[可]	n
10 <sup>12</sup>	太[拉]	T	10 <sup>-1</sup>	分	d	10 <sup>-15</sup>	飞[母托]	p
10 <sup>9</sup>	吉[咖]	G	10 <sup>-2</sup>	厘	c	10 <sup>-18</sup>	阿[托]	f
10 <sup>6</sup>	兆	M	10 <sup>-3</sup>	毫	m			a
10 <sup>3</sup>	千	k	10 <sup>-6</sup>	微	μ			

与 SI 单位的换算率 (1N = 1/9.806 65 kgf)

量	SI		SI 以外		与 SI 单位的换算率
	单位名称	记号	单位名称	记号	
能量、热量、功或焓	焦[耳] (牛顿·米)	J (N·m)	尔格 卡路里(国际) 千克力·米 千瓦·小时 美制马力 电子电压	erg cal IT kgf·m kW·h PS·h eV	10 <sup>7</sup> 1/4.186 8 1/9.806 65 1/(3.6×10 <sup>6</sup> ) ≈3.776 72×10 <sup>-7</sup> ≈6.241 46×10 <sup>18</sup>
功率、电力或放射能	瓦[特] (焦耳每秒)	W J/s	千克力·米每秒 千卡路里每小时 美制马力	kgf·m/s kcal/h PS	1/9.806 65 1/1.163 ≈1/735.498 8
粘度,粘性系数	帕[斯卡]·秒	Pa·s	泊 千克力·秒每平方米	P kgf·s/m <sup>2</sup>	10 1/9.806 65
运动粘度,运动粘性系数	平方米每秒	m <sup>2</sup> /s	斯[托克斯]	St	10 <sup>4</sup>
温度,温度差	开[尔文]	K	摄氏度,度	℃	[参照注(1)]
电流	安[培]	A			
电荷,电荷量	库[仑]	C	(安[培]秒)[参照注(2)]	(A·s)	1
电压	伏[特]	V	(瓦[特]每秒)	(W/s)	1
电场强度	伏[特]每米	V/m			
电容量	法[拉第]	F	(库[仑]每伏[特])	(C/V)	1
磁场强度	安[培]每米	A/m	奥斯特	Oe	4π/10 <sup>3</sup>
磁通[量]密度	特[斯拉]	T	高斯 伽马	Gs γ	10 <sup>4</sup> 10 <sup>9</sup>
磁通[量]	韦[伯]	Wb	麦克斯韦	Mx	10 <sup>8</sup>
电阻	欧[姆]	Ω	(伏[特]每安[培])	(V/A)	1
电导率	西[门子]	S	(安[培]每伏[特])	(A/V)	1
电感	亨[利]	H	韦[伯]每安[培]	Wb/A	1
光通量	流[明]	lm	(坎德拉·球面度)	(cd·sr)	1
亮度	坎[德拉]每平方米	cd/m <sup>2</sup>	熙提	sb	10 <sup>-4</sup>
照度	勒[克斯]	lx	辐透	ph	10 <sup>-4</sup>
放射性活度	贝可[勒尔]	Bq	居里	Ci	1/(3.7×10 <sup>10</sup> )
照射量	库[仑]每千克	C/kg	伦琴	R	1/(2.58×10 <sup>-4</sup> )
吸收剂量	戈[瑞]	Gy	拉德	rd	10 <sup>2</sup>

注:(1) 从 T K 到 θ℃ 的温度转换公式是 θ = T - 273.15, 在计算温差的场合下是 ΔT = Δθ, 只不过, ΔT 或 Δθ 是用各自的单位开尔文和摄氏度来表示温差的。

(2) 圆括号内的单位名称或者记号, 在它上面或者左侧有表示该单位的定义。

## 内 容 简 介

本书是日本机械学会（JSME）为了提高机械类高校学生的基础知识水平并考虑适应工程技术人员国际认证制度而编写的流体力学教材。全书共 11 章，可分成三大部分。第 1 章至第 4 章主要介绍流体力学的基础知识，包括流体基本性质、流动基础、流体静力学和准一维流动。第 5 章至第 8 章涵盖了流体力学工程应用的基本内容，包括动量定律、管内流动、物体绕流和流体运动方程式。第 9 章至第 11 章的内容包括剪切流动、势流和可压缩流动。这些知识涉及流体力学的基本概念和基础理论。全书注重启发读者对流体力学相关内容的感性认知和深入思考，既有基础知识简明清晰的系统描述，又有新知识的更新拓宽。

本书可作为动力、机械、能源、化工、水利等专业的本科生教材或辅助教材使用，也可供相关工程技术人员参考。

# 《机械工程类专业系列教材》 编译委员会

**指导委员：**（按姓氏音序排列）

过增元（清华大学）  
何雅玲（西安交通大学）  
梁新刚（清华大学）  
廖 强（重庆大学）  
刘 伟（武汉理工大学）  
王如竹（上海交通大学）  
严俊杰（西安交通大学）  
张 兴（清华大学）

**出版委员：**（按姓氏音序排列）

白 皓（北京科技大学）  
戴传山（天津大学）  
李凤臣（哈尔滨工业大学）  
汪双凤（华南理工大学）  
王 迅（天津大学）  
王世学（天津大学）  
魏进家（西安交通大学）  
张 鹏（上海交通大学）  
张信荣（北京大学）

# 《JSME 机械工程类系列教材》 出版委员会

主席	宇高义郎	(横滨国立大学)		
干事	高田一	(横滨国立大学)		
顾问	铃木浩平	(首都大学东京)		
委员	石棉良三	(神奈川工科大学)	西尾茂文	(东京大学)
	远藤顺一	(神奈川工科大学)	花村克悟	(东京工业大学)
	加藤典彦	(三重大学)	原利昭	(新泻大学)
	川田宏之	(早稻田大学)	北条春夫	(东京工业大学)
	喜多村直	(九州工业大学)	松冈信一	(富山县立大学)
	木村康治	(东京工业大学)	松野文俊	(电气通信大学)
	后藤彰	(荏原综合研究所)	圆山重直	(日本东北大学)
	志泽一之	(庆应义塾大学)	三浦秀士	(九州大学)
	清水伸二	(上智大学)	三井公之	(庆应义塾大学)
	新野秀宪	(东京工业大学)	水口义久	(山梨大学)
	杉本浩一	(东京工业大学)	村田良义	(明治大学)
	武田行生	(东京工业大学)	森田信义	(静冈大学)
	陈玳珩	(东京理工大学)	森栋隆昭	(湘南工科大学)
	辻知章	(中央大学)	汤浅荣二	(武藏工业大学)
	中村元	(防卫大学校)	吉泽正绍	(庆应义塾大学)
	中村仁彦	(东京大学)		

## JSME 系列教材中文版序

当今世界全球化发展极为迅猛，无论是政治与经济，还是科学技术与文化等国际诸领域间的交流都日益紧密，与此相伴随的信息、资金、技术与人才的跨国界流动更是成为塑造未来世界的重要因素。科学技术是第一生产力，而科技发展的关键在于人才。所以人才的国际化培养对提高我国的改革开放水平，提升我国的国际竞争力，促进我国国民经济和科学技术的发展无疑是至关重要的。为适应此国际化的需求，我国的一些重点高校已将人才的国际化培养作为一项重要工作列入学校的中长期发展规划。就人才的国际化培养来讲，有多种可行的方式，如向国外派遣留学生、接受外国留学生，或者请外籍教师来华授课、派教师到国外讲学等。这些方式背后的实质目标是要求我们培养的学生和国际上主要国家的同类学生相比具有同等的知识水平和解决实际问题的能力。而认定学生是否具备了这种水平和能力的方法，主要是通过考试 [如美国工程基础能力检定考试 (FE) 等]，或者是考查其所受教育的课程体系与内容。前者主要是针对作为个体的学生，而后者主要是针对作为教育机构的学校。

为逐步适应国际标准的技术人员教育认定制度，日本在 1999 年成立了“日本技术者教育认定机构”(JABEE)，其与各类科学技术协会密切合作，进行技术人员教育制度的审查和认定，并通过加入华盛顿协议 (Washington Accord, 1989. 11) 实现了与欧美主要国家间的相互承认，为日本的人才走向世界打开了大门。此外，为了配合技术教育认定，日本各高校在课程设置和教材选用上都作了改革。在系列改革中，一套与国际标准接轨，有目的地对大学本科进行专门教育的教科书显得至关重要。在此背景下，日本机械工程学会编辑和出版了 JSME 系列教材。教材的编者队伍汇集了日本国内各相关领域的著名学者，实力雄厚。该系列教材可谓集大家之成，出版以来深受欢迎，其中《流体力学》一书已第 9 次印刷，销量已突破 43 000 册，在版本林立的工科专业课教材中堪称奇迹。

这样一套教科书对于正在全面进行工程教育改革，提升国际化水平的我国工程高等学科教育来说应是极具参考价值的。为此，北京大学出版社与 JSME 协商，组织了本系列教材的中文版编译出版工作。编译工作由北京大学、清华大学、天津大学等高校教师共同完成，他们均有长期在日从事相关领域学习或研究工作的经历且在各自专业领域多有建树。因此，我们非常高兴看到国内年轻的学者在引进国外优秀教材方面所作出的积极努力，相信本系列教材中文版的出版一定会有助于我国工程教育人才的国际培养并促进我国的高等工程教育国际化认证工作的发展。

以上一点感想聊以为序。

过增元  
2013 年 6 月



## 译者前言

流体力学不仅是描述自然界中物理现象的一门重要的基础科学，也是多数工科高等院校本科生尤其是机械类学生必修的一门基础课。

日本机械工程学会 (JSME) 为了提高机械类高等院校学生的基础知识水平，参考了国际技术工作者教育认定制度 (如日本 JABEE、美国 FE 等认证考试要求)，并希望从学会的角度展示机械工程类的大学教育标准，成立了一个由横滨国立大学 Yoshio Utaka 教授为主任的教科书出版委员会，负责组织编写和出版机械工程类本科生系列适用教材。该委员会于 2002 年开始陆续出版了《热力学》《传热学》和《流体力学》等系列教材。该系列教材的主要特点是：

- (1) 编者众多且皆为在各自研究领域有所成就的专家；
- (2) 内容经过众多编者反复讨论而最终成稿；
- (3) 图表配置在对应内容的页面边缘部分并采用双色印刷以方便阅读；
- (4) 主要专业术语均有英文注解并突出显示，使本书重点突出，便于对照学习；
- (5) 参考了美国 FE 考试要求 (Fundamentals of Engineering Examination)，采用了部分英文习题。

该系列教材近年来在日本国内陆续出版，一推出即受到读者广泛关注和欢迎。其中《流体力学》一书已 9 次印刷，累计发行超过 43 000 册。

2007 年底，该系列教科书《热力学》和《传热学》的主编日本东北大学 Shigenao Maruyama 教授同北京大学教授张信荣博士讨论了将《热力学》一书编译成中文版的想法。2008 年年初，横滨国立大学 Yoshio Utaka 教授又向天津大学教授王世学博士建议将该系列教材介绍给中国读者。其后经各方共同协商和准备，决定成立中方编译委员会统一编译日本机械学会这套机械工程系列教材，并由北京大学出版社统一予以出版。由于原教材是面向日本国内的，部分讲解资料和习题采用了日本的行业标准和习惯。为了适应中国高校的教学特点，方便中国读者学习和使用本教材，编译者在征得日本机械学会的同意后对原书部分文字和图片内容作了修订和重新编辑。

本书由清华大学祝宝山、北京大学张信荣和天津大学王世学负责组织编译和校订。章节编译工作方面，第 1 章和第 7 章由北京大学张信荣，第 2 章和第 9 章由天津大学王世学，第 3 章和第 8 章由清华大学祝宝山，第 4 章由天津大学王迅，第 5 章由哈尔滨工业大学李凤臣，第 6 章由西安交通大学魏进家，第 10 章由上海交通大学张鹏，第 11 章由清华大学王宏等分别负责。祝宝山同时承担了全书的统稿和校正工作。另外，北京大学博士研究生陈林和清华大学李凯也参与了本书的校对整理与协调工作，他们同北京大学出版社胡伟晔编辑一道努力，为本书的顺利出版付出了辛勤的汗水。

在本书的编译过程中也得到了日本机械学会教科书出版委员会以及日本东北大学 Shigenao Maruyama 教授，神奈川工科大学 Ryozo Ishiwata 教授等的关心指导和大力支持，在此我们表示衷心的感谢。

另外，我们还要感谢北京大学出版社的大力支持和帮助。

编译委员会  
2013 年 6 月

## 序 言

JSME 系列教材是针对大学本科生的，以机械工程学入门必修课内容为出发点，涵盖机械工程学的基本内容，并涉足技术人员认定制度所发行的教科书。

自 1988 年日本出版事业相关规定修改以后，日本机械工程学会得以直接编辑并出版发行教科书，但系统地囊括机械工程学各个领域的书籍至今未有出版。这是因为已有大量的同类书籍出版，如本会所出版的《机械工程学便览》《机械实用便览》等在机械科学中都可以作为教材、辅助教材来使用。然而，随着全球化的发展，技术人员认证系统的重要性愈加突出，因此与国际标准接轨，须有目的地对大学生进行专门教育。本科教育环境急剧变化，与此对应的各个大学进行了教育内容方面的改革，也产生了出版与之相应的教科书的需求。

在这种背景下，我们策划出版了本系列教材，其特点如下：

(1) 此系列教材是日本机械工程学会为在大学中示范机械工程学教育标准而编写的教科书。

(2) 有助于在机械工程学教育中保持从入门到作为必修科目的学习连贯性，提高大学本科生的基础知识能力。

(3) 考虑到应对国际标准的技术人员教育认定制度 [日本技术人员教育认定机构 (JABEE)]、技术人员认证制度 [美国工程基础能力检定考试 (FE)，技术人员一次性考试等]，在各教材中引入相关的技术英语。

此外，在编辑、执笔过程中，为实现上述特点，采取了以下措施：

(1) 采用了较多的编写者共同商议式的策划与实施。

(2) 集结了各领域的全部力量，尽可能地优质低价出版。

(3) 在页面的一侧使用图表、双色印刷等以方便阅读。

(4) 参考美国的 FE 考试 [工程学基础能力检定考试 (Fundamentals of Engineering Examination)] 习题集，设置了英语习题。

(5) 配合各教科书出版了相应的习题集。

本出版分科委员会特别注意致力于编辑、校正工作，努力发行具有学会特色的优质书籍。具体来说，各领域的出版分科委员会以及编写小组都采用集体负责制，实施多数人商议校正制度，最后由各领域资深校阅者负责校正工作。

经过所有同人的共同努力，本系列教材得以成功出版。在此，向为出版出谋划策的出版事业全会、编撰理事，出版分科委员会的各位委员，承担出版、策划、实施及最终定稿的各领域出版分科委员会的各位委员，特别是在短时间内按照教科书的特点在形式上进行修改直至最终定稿的各位编者，再次表达诚挚的谢意。此外，向本会出版集团积极担当出版业务的各位同人真诚致谢。

本系列教材若能有助于提高机械工程类学生的基础知识与能力，同时被更多的大学作为教材使用，为技术人员教育贡献绵薄之力，将会是我们的荣幸。

社团法人：日本机械工程学会

JSME 系列教材出版分科会

主任：宇高义郎

2002 年 6 月

## 前 言

流体力学是一门研究气体和液体的力学科学。流动现象和技术所涉及的范围非常广，并且与诸多领域的科学技术相关联。因此，在日本机械学会的 21 个部门中，流体工学部门是会员最多的主干部门之一。可以看出，流体力学在工程力学，甚至在整个科学技术领域中占有十分重要的地位。

对于力学系的学生以及从事力学相关专业的技术人员来说，流体力学是非常重要的基础学科之一。但是，以空气和水等为代表的许多流体都是透明且没有固定形状的，既看不见也摸不着。于是，这就给人们留下了“流体力学让人难以理解”的印象。的确，乍看之下，流体力学所涉及的都是一些不可思议、难以预测的现象。但是，正是这些未知的东西赋予了流体力学强大的魅力。解开看不见的物体背后未知的现象，并将之应用于科学技术中，这是一项充满成就感的工作，也是科技发展的重要动力。虽然流体力学有一定难度，但只要我们对其基本内容有所理解，便有可能将其灵活地运用到许多技术领域中去。希望本书能对读者有所帮助。

本书的作者都是流体力学方面的专家，他们不仅活跃在日本机械学会，同时也在其他学会以及各类社会活动中扮演着重要的角色。他们在繁忙的工作中抽出宝贵的时间，满怀热情写下了这本书。为了降低本书的价格，各位作者以统一的格式进行创作，甚至自己准备了本书的插图。在他们的努力下，本书收纳了大量简明易懂的插图。另外，出于国际化的考虑，本书例题和各章节末的练习题近半数采用了英文。

由于编辑工作的延迟，本书的出版从企划开始花费了 4 年的时间。在这里，对在此期间全力付出的作者们、校对者们，以及给予诸多帮助的各方人士，表示衷心的感谢。

JSME 系列教材出版小组委员会

《流体力学》教材

主编 石绵良三

2005 年 2 月

----- 《流体力学》 编者·出版小组委员会委员 -----

编者·委员	石绵良三	(神奈川工科大学)	第 1 章、第 2 章、编辑
委员	后藤 彰	((株)荏原综合研究所)	校对
编者	酒井康彦	(名古屋大学)	第 3 章
编者	高见敏弘	(冈山理科大学)	第 6 章
编者	平原裕行	(埼玉大学)	第 10 章、第 11 章
编者	古川雅人	(九州大学)	第 5 章
编者	水沼 博	(首都大学东京)	第 8 章
编者	望月 修	(东洋大学)	第 4 章
编者	山本 诚	(东京理科大学)	第 7 章、第 9 章
综合校对	黑川淳一	(横浜国立大学)	

# 目 录

第 1 章 流体的性质与分类(Properties of Fluids)	1
1.1 概论(introduction)	1
1.1.1 流体力学的定义(what is fluid mechanics)	1
1.1.2 本书的使用方法(how to use this book)	2
1.2 流体的基本性质(properties of fluids)	3
1.2.1 密度和比重(density and specific weight)	3
1.2.2 粘度和运动粘度(viscosity and kinematic viscosity)	3
1.2.3 体积弹性模量和压缩率(bulk modulus of elasticity and compressibility)	5
*1.2.4 表面张力(surface tension)	5
1.3 流体的分类(classification of fluids)	6
1.3.1 粘性流体和非粘性流体(viscous and inviscid fluid)	6
1.3.2 牛顿流体和非牛顿流体(Newtonian and non-Newtonian fluids)	7
1.3.3 可压缩流体和不可压缩流体(compressible and incompressible fluids)	8
1.3.4 理想流体(ideal fluid)	8
1.4 单位与量纲(units and dimensions)	9
1.4.1 单位制(systems of units)	9
*1.4.2 量纲(dimension)	10
习 题	11
第 2 章 流体流动基础(Fundamentals of Fluid Flow)	13
2.1 表征流体流动的物理量(properties of fluid flow)	13
2.1.1 速度和流量(velocity and flow rate)	13
*2.1.2 流体的加速度(acceleration of flow)	14
2.1.3 压力和切应力(pressure and shear stress)	15
*2.1.4 流线、脉线、迹线(stream line, streak line and path line)	15
*2.1.5 流体的变形与旋转(deformation and rotation of fluid)	16
2.2 流动分类(classification of flows)	18
2.2.1 定常流动与非定常流动(steady and unsteady flows)	18
2.2.2 均匀流动与非均匀流动(uniform and non-uniform flows)	18
2.2.3 涡(vortex)	18
2.2.4 层流和湍流(laminar and turbulent flows)	19
2.2.5 多相流(multi-phase flow)	20
习 题	21

第 3 章 流体静力学 (Fluid Statics)	23
3.1 静止流体中的压力 (pressure in a static fluid)	23
3.1.1 压力和各向同性 (pressure and its isotropy)	23
*3.1.2 欧拉平衡方程式 (Euler's equilibrium equation)	24
3.1.3 重力场中的压力分布 (pressure distribution in the gravity field)	26
3.1.4 压力计 (manometer)	29
3.2 作用在面上的流体静压力 (hydrostatic forces on surfaces)	33
3.2.1 作用在平面上的力 (force on flat surfaces)	33
3.2.2 作用在曲面上的力 (force on curved surfaces)	35
3.3 浮力和浮体的稳定性 (buoyancy and stability of floating bodies)	36
3.3.1 阿基米德原理 (Archimedes' principle)	36
*3.3.2 浮体的稳定性 (stability of floating bodies)	37
3.4 相对平衡状态下的压力分布 (pressure distribution in relative equilibrium)	39
3.4.1 直线运动 (linear motion)	40
3.4.2 强制涡 (forced vortex)	40
习 题	42
第 4 章 准一维流动 (Quasi-one-dimensional Flow)	47
4.1 连续方程 (continuity equation)	47
4.2 质量守恒定律 (conservation of mass)	49
4.3 能量方程 (energy equation)	52
4.4 贝努利方程 (Bernoulli's equation)	55
习 题	61
第 5 章 动量定理 (Momentum Principle)	67
5.1 质量守恒定律 (conservation of mass)	67
5.2 动量方程 (momentum equation)	70
5.3 动量矩方程 (moment-of-momentum equation)	80
习 题	84
第 6 章 管内流动 (Pipe Flows)	89
6.1 管流摩擦损失 (friction loss of pipe flows)	89
6.1.1 流体的粘性 (viscosity of fluid)	89
6.1.2 管流摩擦损失 (friction loss of pipe flow)	89
6.2 直圆管内流动 (straight pipe flow)	90
6.2.1 进口段流动 (inlet flow)	90
6.2.2 圆管内层流 (laminar pipe flow)	91
6.2.3 圆管内湍流 (turbulent pipe flow)	93
6.3 扩散、收缩管内流动 (divergent and convergent pipe flows)	100

6.3.1	管路各种损失 (losses in piping system)	100
6.3.2	截面积突变的管路 (pipes with abrupt area change)	101
6.3.3	截面积渐变的管路 (pipes with gradual area change)	102
6.3.4	具有节流装置的管路 (pipes with throat)	103
6.4	弯管内的流动 (curved pipe flow)	104
6.4.1	肘形弯头与弧形弯头 (elbow and bend)	104
6.4.2	弯管 (curved pipe)	105
6.4.3	分叉管 (branch pipe)	106
6.5	矩形管内的流动 (rectangular duct flow)	107
	习 题	108
第 7 章	物体绕流 (Flow around a Body)	113
7.1	阻力与升力 (drag and lift)	113
7.1.1	阻力 (drag)	113
7.1.2	升力 (lift)	116
7.2	圆柱绕流和卡门涡 (flow around a cylinder and Karman vortex)	119
7.3	圆柱绕流的锁定现象 (lock-in phenomena of flow around a cylinder)	121
	习 题	122
第 8 章	流体运动方程式 (The Equations of Fluid Motion)	125
8.1	连续方程 (continuity equation)	125
8.2	粘性准则 (viscosity law)	127
8.2.1	压力与粘性应力 (pressure and viscous stress)	127
8.2.2	变形速率 (strain rate)	128
8.2.3	本构方程式 (constitutive equation)	130
8.3	纳维尔-斯托克斯方程式 (Navier-Stokes equations)	132
8.3.1	动量守恒定律 (conservation of momentum)	132
8.3.2	纳维尔-斯托克斯方程式的近似解 (approximation of Navier-Stokes equations)	134
8.3.3	边界条件 (boundary conditions)	136
8.3.4	移动和旋转坐标系 (moving and rotating coordinate system)	136
8.4	欧拉方程式 (Euler's equations)	140
	习 题	141
第 9 章	剪切流 (Shear Flows)	147
9.1	边界层 (boundary layer)	147
9.1.1	边界层理论 (boundary layer theory)	147
9.1.2	边界层方程 (boundary layer equation)	148
9.1.3	边界层沿流动方向的变化 (downstream change of boundary layer)	151
9.1.4	雷诺平均与雷诺应力 (Reynolds average and Reynolds stress)	153

9.1.5	湍流边界层的平均速度分布(mean velocity profile in turbulent boundary layer)	154
9.1.6	边界层的分离和边界层控制 (boundary layer separation and boundary layer control)	155
9.2	射流、尾迹、混合层(jet, wake and mixing layer)	157
	习题	159
第10章 势流(Potential Flow)		161
10.1	势流的基本公式(fundamental equations of potential flow)	161
10.1.1	复数的定义(definition of complex number)	161
10.1.2	理想流体的基本方程(fundamental equations of ideal flows)	162
10.2	速度势(velocity potential)	163
10.3	流函数(stream function)	164
10.4	复势(complex potential)	165
10.5	基本的二维势流(fundamental two-dimensional potential flows)	166
10.5.1	均匀流(uniform flows)	166
10.5.2	点源和点汇(source and sink)	167
10.5.3	涡(vortex)	168
10.5.4	偶极子(doublet)	168
10.6	圆柱绕流(flow around a circular cylinder)	169
10.7	儒科夫斯基变换(Joukowski's transformation)	172
	习题	174
第11章 可压缩流体的流动(Compressible Flow)		177
11.1	根据马赫数的流动分类(flow regimes with Mach number)	177
11.2	可压缩流动的基本方程式(fundamental equations for compressible flow)	179
11.2.1	热力学关系式(thermodynamic equations)	179
11.2.2	声速(sound velocity)	181
11.2.3	连续方程(continuity equation)	182
11.2.4	运动方程(equation of motion)	182
11.2.5	动量方程(momentum equation)	183
11.2.6	能量方程(energy equation)	184
11.2.7	流线与能量方程(streamlines and energy equation)	185
11.3	等熵流动(isentropic flow)	187
11.4	激波关系式(shock wave relations)	192
11.4.1	激波的发生(shock wave generation)	192
11.4.2	正激波的关系式(normal shock wave relations)	193
	习题	196
附录		199

## 第 1 章

# 流体的性质与分类

## (Properties of Fluids)

### 1.1 概论 (introduction)

#### 1.1.1 流体力学的定义 (what is fluid mechanics)

流体力学研究的“流体”指的是气体和液体，流体具有可以自由变换形状的特征。流体运动的状态被称作“流动”，分析研究流体的力学平衡以及运动的学科就是流体力学。

观察我们身边的环境，可以发现我们生活在空气之中，并与水有着密不可分的联系。同时，我们还被许多其他的流体包围着。正是因为地球上水和空气，才会有生命的诞生和生物的进化。

流体和人类的联系是从人类诞生的那天就开始了。世界四大文明中的任何一个，都是在江河流域发展起来的，这并非偶然。在那之前，人们都是一边迁移，一边进行狩猎和采集等活动来维持生活的。然而，此后的人们开始了以农耕为基础的定居生活。河川带来了肥沃优质的土地，再加上灌溉技术的发展，农业生产能力大幅提高，进而带来了人口的增加。乡镇和城市(图 1.1)形成后，灌溉和防洪设施变得更加复杂化，还产生了建设下水道系统的需要。社会进一步发展后，人们建造运河，以船舶运输的方式来进行金属、木材、谷物等的贸易，加快了文明发展的步伐。若是没有河流的存在以及那些与流体相关的技术，可以说这些古代文明是不可能产生的。在此以后的以农耕为基础的文明之中，流体相关技术的传承主要是通过实践经验下的知识积累来实现的。

时间流转到 18 世纪，产业革命的兴起带来了以机械工业为中心的文明的高速发展。在此以后，流体成为了产生能量以及传递能量的重要媒介和手段。蒸汽机能够将热能转化为蒸汽中的能量，再进一步转化为机械能，这里的蒸汽便是一种流体。现在，在商用的发电系统中，大部分都是通过流体来发电的。在水力发电、火力发电、核电和风力发电中(图 1.2)，电能都是通过将流体的能量转化为机械能(发电机中轴旋转的动能)来实现的。

城市的上水道和下水道、城市中的煤气输送、石油输送、生产设备和引擎的送气和排气等利用管路来运送流体的实例，都属于流体力学的应用。不仅如此，与流体力学相关的科学技术所涉及的范围其实非常广。机械技术中非常重要的润滑技术、液压设备技术和气动设备技术等被应用在我们身边各种各样的机械当中。在交通运输工具当中，火箭和航天飞船(图 1.3)、飞机和船舶等自不必说，铁路、高速列车(图 1.4)和汽车等，在对高速度的追求中，如何降低空气阻力，如何防范气动噪声和振动等问题正越来越受到重视，而这些问题正是属于流体力学的范畴。在与建筑和土木相关的行业中，随着

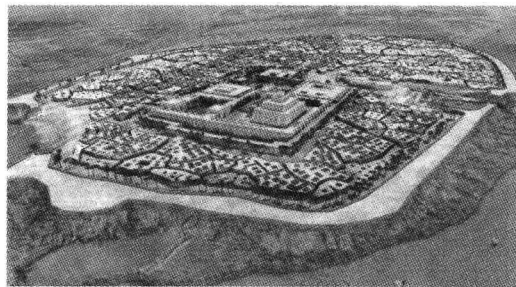


图 1.1 水孕育出了古代文明  
(美索不达米亚的城市乌尔被水所包围)  
(资料提供 大成建设(株))



图 1.2 流体承载着能量  
(风力发电)  
(资料提供 山形县庄内町)

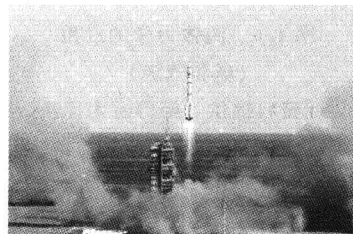


图 1.3 流体力学的应用  
(神舟十号飞船)



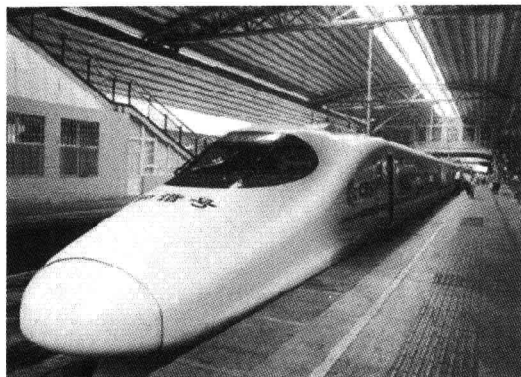


图 1.4 流体力学的应用  
(高速列车)

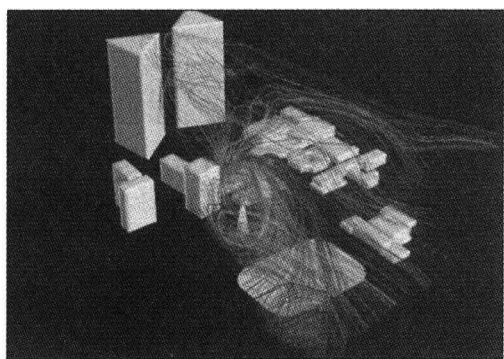


图 1.5 流体力学的应用  
(建筑物周围的空气流动)

[美国科罗拉多州立大学和 ANSYS 公司研究成果]

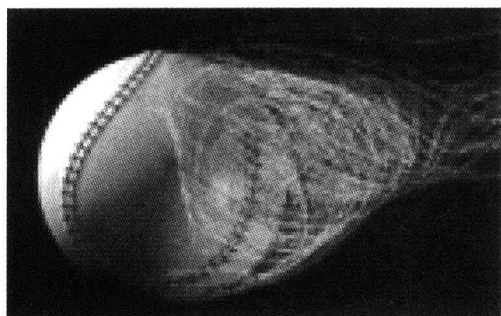


图 1.6 流体力学的应用  
(球和气流)

[资料提供 姬野龙太郎  
(理化学研究所)]

建筑的变大和变高,出现了建筑物结构和相应工业、民用建筑内复杂流体流动(图 1.5)和空调设备等相关的问题。另外,化学工程、医疗工程、生命工程、生物学、电子与电气工程和体育工程(图 1.6)等诸多领域也都与流体力学密切相关。流体在日常生活中以及在工业上都和人类有着密切的联系,所以流体力学应用范围广泛,成为工程力学中重要的科目之一。在 21 世纪,由于环境和能源问题日益严峻,建立循环型社会成了重要的课题。水和大气循环是其中重要的要素。与此同时,还有许多具有各种各样机能的流体,对它们的利用也非常重要。因此,流体力学将肩负史无前例的重要使命。

### 1.1.2 本书的使用方法 (how to use this book)

本书是为了大学生、高等专科生、短期大学学生以及其他社会人士等刚刚开始学习流体力学的初学者所写的入门书籍。所以,本书所讲述的知识从基础开始,涵盖了作为一位力学方面的技术人员所需的必要知识,可作为教科书,亦可用作自学的参考书。另外,本书还考虑到了应对考试的需要,适用于日本技术人员教育认定制度(Japan Accreditation Board for Engineering Education, JABEE)、美国基础工程考试(Fundamentals of Engineering Examination, FE 考试),日本“技术士”第一次测试等各类考试。随着社会的全球化,本书为了符合国际标准,在练习题中采用了近一半的英文题目。

本书在作为大学本科阶段教科书时,标准的使用方法如下所述:

在学习流体力学前,最好能先学习 1 年与微积分有关的科目。特别是学习极限、泰勒级数、偏微分、线性积分和多重积分等知识,这些知识有助于理解流体力学中的数学推导。此外,向量分析的知识也会有所帮助,不过这只需在第 2 年随流体力学一同学习即可。

第 2 学年的上半学期,学习本书第 1 章到第 4 章。这些是流体力学中最为基础的内容,即使将来不以流体力学为专业,只要是机械工程相关专业的学生,也最好能够记住这些知识,因此为必修。

第 2 学年的下半学期,学习本书第 5 章到第 8 章。这些章节中的内容也是流体力学中的基础,对与相关力学专业有关的技术人员来说,也是很有必要学习的。对那些将来要从事与流体相关工作的人员来说,这部分也是应该了解的知识。另外,在各种资格证书考试中,这些知识也是必要的。以上这些是在 1 年的时间中应该学习的内容。

第 9 章到第 11 章的内容可以有选择性地学习。对那些将流体力学作为专业,或者将来有志于从事与流体力学有密切关系的职业技术人员及进行相关研究的人员,这些内容也是必修的,建议在第 3 年中进行学习。在“第 10 章 势流”中,会用到复变函数的理论知识,最好能够提前学习。

以上所归纳的终究只是学习方式的一种。在实际学习中,学校可以依据相关科目的情况,改变课程的安排。对于注重基础的学习者来说可以跳过标有\*(星号)的内容,敬请参考。