

21 世纪能源与动力系列教材
Textbook Series of Energy & Power for 21st Century

工程流体力学

Fluid Mechanics with Engineering Applications

(第3版)

主 编 赵孝保

副主编 周 欣



东南大学出版社
SOUTHEAST UNIVERSITY PRESS

21 世纪能源与动力系列教材

工 程 流 体 力 学

(第 3 版)

主 编 赵孝保

副主编 周 欣

参 编 张 奕 余业珍 武彬彬
解晴键

东南大学出版社

• 南京 •

内 容 提 要

工程流体力学是力学的基本原理在液体和气体中实际应用的一门科学。本书融合了国内外最新教材的特点,侧重于基础性和工程应用性。主要介绍了流体静力学中流体静止或相对静止时流体内压力分布、压力测量、作用在平面和曲面上的静压力;流体运动学中流场、流线、速度分布、有旋与无旋流动、流函数、势函数和流网;流体动力学中不可压缩流体与可压缩流体的质量、能量和动量守恒定律,以及这些定律在管道内部和物体外部流动中的实际应用。

本书可以作为能源动力工程、建筑环境与设备工程、环境工程、机械工程、石油和化学工程、航空航天工程以及生物工程等专业的学生学习的教材,还可以作为从事与流体流动相关的研究和应用的工程技术人员的参考资料。

图书在版编目(CIP)数据

工程流体力学/赵孝保主编. —3 版. —南京:
东南大学出版社, 2012. 6

(21 世纪能源与动力系列教材)

ISBN 978-7-5641-3617-8

I. ①工… II. ①赵… 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(2012)第 140482 号

工程流体力学(第 3 版)

出版发行 东南大学出版社
出 版 人 江建中
社 址 南京市四牌楼 2 号
邮 编 210096

经 销 江苏省新华书店
印 刷 江苏兴化印刷有限公司
开 本 787 mm×1092 mm 1/16
印 张 17.5
字 数 448 千字
版 次 2004 年 1 月第 1 版 2012 年 6 月第 3 版
印 次 2012 年 6 月第 1 次印刷
印 数 1—3500
书 号 ISBN 978-7-5641-3617-8
定 价 35.00 元

(本社图书若有印装质量问题,请直接与营销部联系。电话:025-83791830)

21 世纪能源与动力系列教材编委会

主任 侯小刚

编委 侯小刚 赵孝保 丁轲轲

徐生荣 张 奕 周 欣

郭恩震 卢 平 余跃进

辛洪祥 余业珍 武彬彬

序

热现象是自然界中最普遍的物理现象。工程热力学、传热学是以热现象为研究对象的学科,主要研究热能与机械能或其他形式能量之间的转换与传递规律,研究热能的合理、有效利用技术及方法。热能的转换、传输、控制、优化与利用的各环节都离不开对流体流动规律的认识与利用,离不开燃烧理论与技术的研究与运用。因此,工程流体力学、工程热力学、传热学、燃烧理论与技术等几门课程成为能源与动力类专业的主要技术基础课。

古人云:巧心、劳力、成器物者曰工。作为工程技术学科的教材,要体现探求规律,认识规律,运用规律,物化成果的要求。针对应用型工程技术专业的实际需要,南京师范大学等院校开展了对能源与动力学科系列课程的建设与改革,在此基础上组织编写了工程流体力学、工程热力学、传热学、燃烧理论与技术等课程教材,作为能源动力类系列教材推出。几本教材既相互联系,又各具特色。随着教育、教学改革深入,将陆续出版能源动力类系列教材。

工程专业是关于科学知识的开发应用和关于技术的开发应用的,在物质、经济、人力、政治、法律和文化限制内满足社会需要的,一种有创造力的专业。因此,对于工程应用专业人才,需要他们具备宽广的专业面、全面的工程素质。上述几本教材,还可以作为大多数工程技术专业的公共技术基础课程用,在培养全面发展的工程技术人才方面发挥作用。

侯小刚

2003年10月于南京师范大学

第 3 版 前 言

工程流体力学研究流体在静止和运动时的力学规律及流体与固体壁面间的相互作用力。因为包括空气和水在内的流体广泛存在和应用与生产和生活的各个方面,及流体力学与基础力学的紧密联系,所以工程流体力学不仅是热能与动力工程、建筑环境与设备工程和环境工程等专业的必修的专业基础课程,也是机械工程、冶金工程、石油与化学工程、航空航天工程以及生物工程等诸多领域的基础知识之一。工程流体力学已经成为工科院校大多数工科专业的一门基础课程。

教材第 1 版融合了国内外教材的长处和特点,突出了基础性和应用性,每章后小结汇集了本章重点内容,教材得到了广泛欢迎。教材第 2 版对全书内容作了细致完善,增加了典型例题和习题答案。教材第 3 版再次增加了典型例题,以便强化基础知识的综合应用和考研复习,第 3 版还列出了各章中重要的专业名词及其对照英文,以便双语教学,同时各章中专业名词也是本章需要重点掌握的基本概念和知识点。

教材第 1 版由赵孝保博士任主编,周欣老师任副主编,顾伯勤教授任主审。教材第 2 版和第 3 版由张奕博士、余业珍博士、武彬彬老

师、解晓键博士等增补了典型例题、习题答案及名词英文,全书内容由赵孝保教授审核定稿。

教材编写得到了东南大学出版社朱珉老师的热情支持和帮助,得到了南京师范大学“工程流体力学”精品课程建设项目的资助。由于编者水平所限,书中存在的错误在所难免,敬请读者赐教和指正。

(本教材配有课件,订教材的学校请联系:zhao@njnu.edu.cn)

编者

2012年5月

主要符号表

A	面积(m^2)
a	加速度(m/s^2); 湍流系数(/)
B	宽度(m)
C	流量系数(/)
C_c	收缩系数
c_p	压差阻力系数(/); 比定压热容[$\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$]
c_v	比定容热容[$\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$]
C_f	摩擦阻力系数(/)
C_D	绕流阻力系数(/)
C_L	浮力系数(/)
c	音速(m/s); 压力波传播速度(m/s)
D	直径(m)
d_e	当量直径(m)
E_v	液体弹性模量(N/m^2)
E_s	壁面弹性模量(N/m^2)
e	当量粗糙高度(m)
F	力(N)
F_D	绕流阻力(N)
F_f	摩擦阻力(N)
F_L	浮力(N)
f	单位质量力(N/kg); 旋涡脱离频率(1/s)
G	重量(N)
g	重力加速度($= 9.81\text{m/s}^2$)
H, h	高度(m)
h	比焓
h_f	沿程摩擦阻力损失(m)
h_j	局部阻力损失(m)
h_l	阻力损失(m)
h_p	水泵扬程(m)
K	微压计系数(/); 流动系数(/)
k	比例系数(/); 绝热指数(/)
L, l	管长(m)
L_e	入口段长度(m); 当量管长(m)
M	分子量; 力矩($\text{N} \cdot \text{m}$)
n	转速(r/min)
P	做功量(W)
p	压力(单位面积上的压力)(N/m^2)

p_a	大气压力(N/m ²)
p_l	压力损失(N/m ²)
p_k	表压力(N/m ²)
p_p	风机压头(N/m ²)
p_v	饱和蒸汽压(N/m ²);真空压力(N/m ²)
p_0	驻点处压力(N/m ²)
Q	发热量(J)
q_v	体积流量(m ³ /s)
q_m	质量流量(kg/s)
q	源流强度
R	气体常数[J/(kg·K)];射流断面半径(m)
R_h	水力半径(m)
r	半径(m)
s	射流长度(m);比熵
T	绝对温度(K);力矩(N·m)
T_r	传播时间(s)
t	时间(s)
U, u	流速(m/s);圆周速度(m/s)
u	内能
V	体积(m ³)
V_p	压力体(m ³)
v	比体积;平均速度(m/s)
w	相对速度(m/s)
x	坐标轴(m)
Y	膨胀系数(/)
y	坐标轴(m)
z	坐标轴(m);位置高度(m)
α ['ælfə]	热胀系数(1/K);夹角(°);与速度分布有关的系数(/)
β ['beitə]	液体压缩率(m ² /N);与速度分布有关的系数(/)
χ [kai]	湿周(m)
Γ ['gæmə]	环流量(速度环量)
γ ['gæmə]	重度(N/m ³)
δ [deltə]	平板间距(m);壁面厚度(m);边界层厚度(m)
δ_v	粘性底层厚度(m)
ϵ [epsilən]	运动旋涡粘度(m ² /s)
η ['itə]	旋涡粘度(N·s/m ²);无量纲坐标(= y/δ)
θ ['θitə]	角度(°)
λ ['læmdə]	沿程阻力系数(/)
μ [mju:]	绝对粘度(N·s/m ²)
ν [nju:]	运动粘度(m ² /s)
ζ [zitə]	局部阻力系数(/)
ρ [rou]	密度(kg/m ³)
σ [sigmə]	表面张力(N/m)

τ [tau]	应力(N/m ²)
τ_0	壁面切应力(N/m ²)
φ [fai]	势函数
ψ [psi:]	流函数
Ω ['oumiga]	旋涡量
π [pai]	势函数,无量纲组合参数
ω ['oumiga]	旋转角速度(1/s);旋转速率
Eu	欧拉数($= \frac{p}{\rho v^2}$)
Fr	弗汝德数($= \frac{v^2}{gl}$)
Re	雷诺数($= \frac{vd}{\nu}$)
Ma	马赫数($= \frac{v}{c}$)
We	韦伯数($= \frac{\rho v^2}{\sigma}$)

目 录

主要符号表	(1)
■ 引言	(1)
0.1 流体力学的应用	(1)
0.2 流体力学的内容及发展	(2)
0.3 工程流体力学的学习	(3)
■ 流体性质	(4)
1.1 流体的定义	(4)
1.2 密度与可压缩性	(4)
1.3 理想气体及状态方程	(8)
1.4 粘性	(9)
1.5 表面张力	(14)
1.6 液体的蒸汽压力	(16)
本章小结	(17)
习 题	(18)
■ 流体静力学	(20)
2.1 作用在流体上的力	(20)
2.1.1 质量力	(20)
2.1.2 表面力	(20)
2.2 流体静压力及其特性	(21)
2.2.1 流体静压力	(21)
2.2.2 流体静压力的特性	(21)
2.3 流体的平衡微分方程	(22)
2.3.1 流体的平衡微分方程	(22)
2.3.2 力的势函数和有势力	(23)
2.3.3 等压面	(24)
2.4 重力场中流体的平衡	(24)
2.4.1 静力学基本方程	(24)
2.4.2 静力学基本方程的物理意义与几何意义	(25)
2.4.3 绝对压力 相对压力 真空	(26)
2.5 非惯性坐标系中液体平衡	(28)
2.5.1 等加速直线运动容器内液体的相对平衡	(28)
2.5.2 等角速度旋转容器中液体的相对平衡	(29)
2.6 液柱式测压计	(33)

2.6.1 测压管	(34)
2.6.2 U形管测压计	(34)
2.6.3 U形管差压计	(35)
2.6.4 倾斜微压计	(35)
2.7 静止液体作用在平面上的总压力	(37)
2.7.1 总压力的大小	(38)
2.7.2 总压力的作用点	(38)
2.8 静止液体作用在曲面上的总压力	(42)
2.8.1 总压力的大小和方向	(42)
2.8.2 总压力的作用点	(43)
2.8.3 压力体	(43)
2.9 浮力原理	(46)
本章小结	(49)
习 题	(50)
3 流体动力学基础	(57)
3.1 流场及其描述方法	(57)
3.2 流动的分类	(59)
3.2.1 按流体性质分类	(59)
3.2.2 按与时间的关系分类	(59)
3.2.3 按与空间的关系分类	(59)
3.2.4 按运动状态分类	(60)
3.3 流体流动的基本术语和概念	(60)
3.3.1 迹线	(60)
3.3.2 流线	(60)
3.3.3 流管、流束和总流	(61)
3.3.4 过流断面及水力要素	(62)
3.3.5 流量和平均流速	(62)
3.3.6 稳定流动的类型	(63)
3.4 系统与控制体	(64)
3.4.1 系统与控制体的概念	(64)
3.4.2 系统内的某种物理量对时间的全导数公式	(64)
3.5 一维流动的连续性方程	(66)
3.6 理想流体一维稳定流动伯努里能量方程	(68)
3.6.1 欧拉方程	(68)
3.6.2 伯努里方程	(69)
3.6.3 理想流体一维稳定流动能量方程的物理意义和几何意义	(70)
3.6.4 理想流体相对运动的伯努里方程	(70)
3.7 沿流线主法线方向的压力和速度变化	(71)
3.8 粘性流体总流的伯努里方程	(73)
3.8.1 粘性流体微元流束的伯努里方程	(73)

3.8.2 粘性流体总流的伯努里方程	(73)
3.8.3 恒定气体流动的伯努里方程	(74)
3.9 伯努里方程的应用	(75)
3.10 动量方程与动量矩方程	(80)
3.10.1 动量方程	(80)
3.10.2 动量矩方程	(81)
本章小结	(87)
习 题	(88)
4 量纲分析与相似原理	(95)
4.1 单位和量纲	(95)
4.2 相似性原理	(96)
4.2.1 几何相似	(96)
4.2.2 运动相似	(97)
4.2.3 动力相似	(97)
4.3 相似准则数	(98)
4.3.1 欧拉(Eu)数	(98)
4.3.2 弗汝德(Fr)数	(98)
4.3.3 雷诺(Re)数	(99)
4.3.4 马赫(Ma)数	(99)
4.3.5 韦伯(We)数	(99)
4.4 近似模型试验	(100)
4.5 量纲分析	(102)
4.5.1 瑞利法	(103)
4.5.2 π 定理	(104)
本章小结	(107)
习 题	(108)
5 管内不可压缩流体流动	(110)
5.1 管内层流流动及粘性摩擦损失	(110)
5.1.1 层流与湍流流动	(110)
5.1.2 等截面管道内沿程能量损失	(111)
5.1.3 圆管道内切应力分布	(113)
5.1.4 圆管道内层流流动及粘性摩擦损失	(113)
5.1.5 层流流动入口段长度	(115)
5.2 湍流流动及沿程摩擦阻力计算	(117)
5.2.1 湍流旋涡粘度与混合长度理论	(117)
5.2.2 湍流流动中的粘性底层	(119)
5.2.3 湍流流动中的速度分布	(121)
5.2.4 沿程摩擦阻力系数计算	(123)
5.2.5 摩擦系数曲线图(莫迪 Moody 图)	(124)

5.3 简单管道内流动计算	(125)
5.4 局部阻力损失	(130)
5.4.1 管道进口损失	(131)
5.4.2 突然扩大损失	(132)
5.4.3 渐扩管损失	(133)
5.4.4 管道出口损失	(134)
5.4.5 渐缩管损失	(134)
5.4.6 弯管损失	(134)
5.4.7 其他局部构件阻力损失	(135)
5.5 管路流动计算	(136)
5.5.1 简单管路流动阻力计算	(136)
5.5.2 管道中有泵、风机和水轮机时的管路计算	(137)
5.6 管路及管网阻力计算	(139)
5.6.1 串联管路	(139)
5.6.2 并联管路	(142)
5.6.3 分叉管路系统	(144)
5.6.4 管网计算	(146)
5.7 管路中的水锤现象	(148)
本章小结	(150)
习 题	(151)
6 绕流流动与边界层	(154)
6.1 绕流流动阻力与边界层	(154)
6.1.1 绕流流动阻力	(154)
6.1.2 边界层	(155)
6.2 平板边界层的摩擦阻力	(155)
6.2.1 平板边界层动量方程	(155)
6.2.2 平板层流边界层的摩擦阻力	(157)
6.2.3 平板湍流边界层的摩擦阻力	(158)
6.2.4 平板边界层具有过渡区时的摩擦阻力	(160)
6.3 曲面物体绕流阻力	(160)
6.3.1 边界层分离和压差阻力	(160)
6.3.2 流体绕流曲面物体的阻力	(162)
6.3.3 流体绕流长柱体的阻力	(166)
6.4 升力	(168)
6.5 气体射流	(169)
6.5.1 射流结构与特征	(169)
6.5.2 圆断面射流参数计算	(170)
6.6 纳维尔-斯托克斯方程(N-S方程)及其求解	(172)
6.6.1 粘性应力分析	(172)
6.6.2 粘性力	(173)

6.6.3 N-S方程	(173)
6.6.4 N-S方程的求解	(174)
本章小结	(176)
习 题	(177)
7 理想流体流动	(179)
7.1 连续性方程	(179)
7.2 非旋转流动	(180)
7.3 速度环量与旋涡量	(182)
7.4 流函数	(183)
7.5 基本流动的流场与流场叠加	(184)
7.5.1 均匀直线流动	(184)
7.5.2 源流或汇流	(184)
7.5.3 流场叠加	(184)
7.6 速度势	(186)
7.7 流网	(187)
本章小结	(190)
习 题	(191)
8 流体测量	(193)
8.1 流体物性测量	(193)
8.2 静压测量	(195)
8.3 用毕托(Pitot)管测量流速	(196)
8.4 测量速度的其他方法	(197)
8.4.1 水流计和风速仪	(197)
8.4.2 热线风速仪	(197)
8.4.3 漂浮测量	(197)
8.4.4 照相和光学测量	(197)
8.4.5 激光技术	(198)
8.4.6 其他测速仪器与方法	(198)
8.5 流量测量	(198)
8.6 孔口、喷嘴和管嘴出流	(199)
8.6.1 出流的定义	(199)
8.6.2 出流系数	(199)
8.6.3 自由出流的水头损失	(200)
8.6.4 淹没出流的水头损失	(200)
8.7 文丘里(Venturi)流量计	(203)
8.8 喷嘴流量计	(204)
8.9 孔板流量计	(205)
8.10 可压缩流体的流量测量	(207)
8.11 测量流量的其他方法	(209)

本章小结·····	(209)
习 题·····	(210)
9 可压缩流体的流动 ·····	(212)
9.1 音速 马赫数 ·····	(212)
9.1.1 音速 ·····	(212)
9.1.2 马赫数(Ma 数) ·····	(213)
9.1.3 微弱扰动在气体中的传播 ·····	(214)
9.2 气体一维定常等熵流动 ·····	(215)
9.2.1 基本方程 ·····	(215)
9.2.2 三种特定状态 ·····	(216)
9.2.3 速度系数 ·····	(218)
9.3 喷管中的等熵流动 ·····	(219)
9.3.1 气流参数与通道截面的关系 ·····	(219)
9.3.2 喷管 ·····	(220)
9.4 有摩擦的绝热管流 ·····	(223)
9.4.1 有摩擦管流流动分析 ·····	(223)
9.4.2 有摩擦管流中气流参数的计算 ·····	(224)
9.5 在等截面管中有摩擦的等温流动 ·····	(226)
9.6 超音速气流的绕流与激波 ·····	(228)
9.6.1 激波的产生及分类 ·····	(228)
9.6.2 正激波的形成及传播速度 ·····	(229)
9.6.3 膨胀波 ·····	(230)
9.6.4 斜激波 ·····	(231)
9.7 激波前后气流参数的关系 ·····	(232)
9.7.1 正激波前后气流参数的关系 ·····	(232)
9.7.2 斜激波前后气流参数的关系 ·····	(236)
9.7.3 波阻的概念 ·····	(239)
9.8 变截面管流变工况流动分析 ·····	(241)
9.8.1 收缩喷管变工况流动分析 ·····	(241)
9.8.2 喷管出口处的流速、流量及面积比 ·····	(241)
9.8.3 缩放喷管变工况流动分析 ·····	(242)
本章小结·····	(245)
习 题·····	(246)
习题答案·····	(248)
专业词汇中英文对照·····	(254)
参考文献·····	(263)

流体包括气体和液体,其中空气和水是最典型而广泛存在的流体。流体力学是研究流体平衡和运动规律以及流体与固体壁面间作用力的一门科学。本书除了特殊情况,一般不严格区分液体和气体,统称为流体,因为它们具有相同的行为和现象。

0.1 流体力学的应用

流体及流体力学现象充斥在我们生活的各个方面,如云彩的漂浮、鸟的飞翔、水的流动、波浪的上下起伏、天气变化、风速变化、呼吸空气、说话和声音等普遍存在于我们日常生活中;管道内液体流动、风道内气体的流动、空气阻力和升力、建筑物上风力的作用、土壤内水分的运动、石油通过地质结构的运动、射流、润滑、燃烧、灌溉、冶炼、海洋等都是存在于生活及生产各个方面;血液和氧气在人体内的流动,如心脏泵送血液将氧气和营养提供给细胞,将废物带出并保持身体内的均匀温度,肺吸入氧气并排出二氧化碳等使流体力学与生物工程和生命科学相联系;水从地下、湖泊或河流中用泵输送到每家每户的供水系统和废水的排放系统,液体和气体燃料送到炉膛内燃烧产生热水或蒸汽用于供热的供热系统或产生动力的动力系统,通过流体携带将热量从低温送到高温空气中的制冷系统,在炎热的夏季将室内热量送到室外的制冷与空调系统,废液和废气的处理与排放系统等等使流体力学现象与日常生活密切相关;个人计算机冷却系统、水库和导管、城市水处理厂、垃圾焚烧炉和发电厂以及家用电器等等都表明了流体力学及现象无处不在;飞机和船舶的设计不仅要求它们能够在流体中保持住,即使在恶劣的天气下也不会损坏,而且还要求消耗最小的能量以获得最快的速度,汽车设计也是如此;电是我们生活中的不可缺少的能量,绝大多数电能是利用流体机械将燃料的化学能、蓄水的重力能,甚至风的动能转换得到的,所有这些设计和应用都说明流体力学在工程技术及高技术领域的突出应用。

总之,了解和掌握流体力学知识可以更好地理解和设计,如发电厂系统、化工系统及设备、水供给及处理系统与设备、供热与空调系统、废液和废气处理系统与设备、汽轮机、水泵及风机等流体机械设备、水坝溢水结构、阀门、流量计、水力波的吸收和制止、汽车、飞机、船舶、潜艇、火箭、轴承、人工器官、甚至体育中的高尔夫球和赛车等等。流体力学是动力工程、城市建筑工程、环境工程、机械工程、石油和化学工程、航空航天工程以及生物工程等诸多领域研究和应用的最基础的知识之一。因此,在以上领域从事与流体流动相关的研究和工程应用的技术人员都应该或必须了解流体力学的基本原理及应用。