



21世纪全国高等院校汽车类**创新型**应用人才培养规划教材

工程流体力学

杨建国 张兆营 鞠晓丽 谭建宇 编著



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

21 世纪全国高等院校汽车类创新型应用人才培养规划教材

工程流体力学

杨建国 张兆营 鞠晓丽 谭建宇 编著

 北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

内 容 简 介

工程流体力学是研究流体之间能量相互转换规律的一门学科,是高等院校机械类、材料类、仪器仪表类、航空航天类、建筑工程类、热动力类和流体动力工程类专业学生必修的技术基础课程。本书共 12 章,内容包括绪论、流体的物理特性、流体静力学、流体运动学、流体动力学 I、流体动力学 II、相似原理与量纲分析、不可压缩流体的内部流动、不可压缩粘性流体的外部流动、可压缩流体的一维流动、流体的测量、计算流体力学简介。

本书可作为能源动力类、机械类专业的本科生教材、教师和研究生的参考书,也可作为各相关专业工程技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

工程流体力学/杨建国,张兆营,鞠晓丽,谭建宇编著. —北京:北京大学出版社,2010.1

(21 世纪全国高等院校汽车类创新型应用人才培养规划教材)

ISBN 978-7-301-12365-2

I. 工… II. ①杨…②张…③鞠…④谭… III. 工程力学:流体力学—高等学校—教材 IV. TB126

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 083150 号

书 名:工程流体力学

著作责任者:杨建国 张兆营 鞠晓丽 谭建宇 编著

责任编辑:童君鑫

标准书号:ISBN 978-7-301-12365-2/TH·0026

出版者: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> <http://www.pup6.com>

电 话:邮购部 62752015 发行部 62750672 编辑部 62750667 出版部 62754962

电子邮箱:pup_6@163.com

印刷者:北京飞达印刷有限责任公司

发 行 者:北京大学出版社

经 销 者:新华书店

787 毫米×1092 毫米 16 开本 20.25 印张 彩插 2 467 千字

2010 年 1 月第 1 版 2010 年 1 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

电子邮箱:fd@pup.pku.edu.cn

前 言

流体力学的研究对象包括液体和气体两大物质形态,描述流体力学规律的有数学分析、复变函数及张量分析等多种方法,研究流体运动规律和求解流体力学问题的方法包括理论分析、量纲分析、实验研究和数值计算等,因此流体力学的理论非常广泛,尤其和数学理论的关系十分密切。工程流体力学是在阐述流体力学基本理论的基础上,重点阐述和研究流体力学在工程上的应用。工程流体力学广泛应用于动力、水利、机械、化工、石油、土建、冶金、航空、航海、气象、环境等众多领域,是这些领域相关专业的主干技术基础课程。

工程流体力学是一门相对古老的学科,国内外有关工程流体力学的书籍不少,也各有特点,但是随着科学技术的进步和社会的发展,工程流体力学也在不断地发展。本书的编写重点针对我国目前动力工程和机械领域对工程流体力学发展的需求,突出表现为以下几个特点。

(1) 根据目前越来越多的工程领域广泛借助计算机,采用数值计算的手段来求解流场的现实和前景,本书对微分形式的流体力学方程及其求解有所突出。首先,将微分形式的流体力学方程单独一章编写,即第6章;其次,在不可压缩流体有压管流和边界层理论中强调微分方程的求解方法;再次,编写了计算流体力学一章,即第12章,在第12章中介绍了计算流体力学(CFD)的基本方程(其中补充了微分形式的能量方程)、思想方法和目前流行的大型商业软件。

(2) 积分形式的连续性方程、能量方程、动量方程的推导均从输运方程出发,突出控制体的概念和欧拉法在工程流体力学的地位。

(3) 根据编者从事工程流体力学双语教学的经验,从国外优秀的工程流体力学书籍中选取了有关术语和要点的英文表述,穿插于本书的相应之处。读者通过阅读这些英文表述基本可以熟悉工程流体力学的英文术语和要点内容的英文表述形式,一方面增强了对相应内容的理解,另一方面也为阅读工程流体力学的英文文献打下了基础。

(4) 书中的插图采用形象化图形,便于读者理解。

本书的第1~5章、6.1~6.6节、12.1节、12.2节由杨建国编写,第7章、8.7节、第9~11章由张兆营编写,6.7~6.9节、8.1~8.6节由鞠晓丽编写,12.3~12.7节由谭建宇编写。全书的英文部分由杨建国编写,各章导入案例、工程实例和插图由张兆营制作,全书由杨建国统稿。

限于编者的水平,书中难免有疏漏和不妥之处,恳请读者批评指正。

编 者

2009年10月

目 录

第 1 章 绪论(Introduction)	1
1.1 流体力学的研究内容和方法 (Scope of Fluid Mechanics)	2
1.2 流体力学发展简史(Historical Sketch of the Development of Fluid Mechanics)	3
1.3 流体的连续介质模型(Continuum Assumption of Fluids)	6
1.4 量纲和单位(Dimensions and Units)	8
1.5 作用在流体上的力(The Forces acting on the Fluid)	10
1.5.1 质量力(Mass Force)	10
1.5.2 表面力(Surface Force) ...	10
工程实例	11
习题	12
第 2 章 流体的物理特性(Properties of Fluids)	13
2.1 流体的重度(Specific Weight of Fluids)	14
2.2 流体的压缩性和膨胀性 (Compressibility and Expansibility of Fluids)	15
2.2.1 流体的压缩性(Compressi- bility of Fluids)	15
2.2.2 流体的膨胀性(Expansibility of Fluids)	15
2.2.3 可压缩流体和不可压缩流体 (Compressible and Incompr- essible Fluids)	16
2.3 流体的粘性(Viscosity of Fluids) ...	17
2.3.1 牛顿内摩擦定律(Newton's Equation of Viscosity)	17
2.3.2 粘度(Viscosity)	18
2.3.3 牛顿流体和非牛顿流体 (Newtonian and Non- Newtonian Fluids)	20
2.3.4 粘性流体和理想流体(Viscous and Ideal Fluids)	21
2.4 液体的表面张力(Surface Tension of Fluids)	21
2.4.1 表面张力(Surface Tension) ...	21
2.4.2 毛细现象(Capillary Phenomena)	23
工程实例	24
习题	25
第 3 章 流体静力学(Ffluid Statics)	27
3.1 流体的静压强(Pressure in a Fluid at rest)	28
3.2 流体平衡微分方程(Basic Equation for Pressure Field)	30
3.2.1 流体的平衡微分方程式(Ffluid Equilibrium Equation)	30
3.2.2 压强微分方程(Pressure Differential Equation)	31
3.2.3 等压面(Equipressure Surface)	32
3.3 压强的基准(Reference of Pressure)	33
3.4 静止流体中的压强分布(Pressure Variation in a Fluid at rest)	33
3.4.1 流体静力学基本方程式 (Fundamental Equation of a Fluid at rest)	33
3.4.2 流体静力学基本方程式的 物理意义和几何意义(Physical Interpretation and Geometric Interpretation of the Fund- amental Equation)	34



3.4.3 重力场中的压强分布 (Pressure Variation in the Gravity Field)	35
3.4.4 静压强分布图(Pressure Distribution Diagram)	37
3.4.5 可压缩流体中的压强分布 (Pressure Variation in the Compressible Fluid at rest)	37
3.5 流体静压强的测量 (Measurement of Pressure)	39
3.5.1 气压计(Barometer)	39
3.5.2 测压管(Piezometer Tube) ...	40
3.5.3 U形管测压计(U-tube Manometer)	40
3.5.4 差压计(Differential U-tube Manometer)	40
3.5.5 微压计(Inclined-tube Manometer)	41
3.6 流体的相对平衡(Relative Equilibrium)	42
3.6.1 等加速水平直线运动 (Linear Motion with Invariable Acceleration)	43
3.6.2 等角速转动(Rigid-body Rotation)	44
3.7 静止流体对壁面的作用力 (Hydrostatic Force)	47
3.7.1 静止流体作用在平面上的总压力(Hydrostatic Force on a Plane Surface)	47
3.7.2 静止流体作用在曲面上的总压力(Hydrostatic Force on a Curved Surface)	51
3.7.3 作用在液体中物体上的总压力(Buoyant Force) ...	54
工程实例	55
习题	56
第4章 流体运动学 (Fluid Kinematics)	61
4.1 描述流场的拉格朗日法和欧拉法 (Lagrangian and Eulerian Flow Descriptions)	62
4.1.1 拉格朗日法(Lagrangian Flow Description)	62
4.1.2 欧拉法(Eulerian Method) ...	63
4.1.3 随体导数(The Material Derivative)	63
4.2 速度场和加速度场(Velocity Field and Acceleration Field)	64
4.2.1 速度场(Velocity Field) ...	65
4.2.2 加速度场(Acceleration Field)	65
4.3 关于流场的一些基本概念(Some Concepts for Flow Description) ...	66
4.3.1 一维、二维和三维流动 (One-, Two- and Three-Dimensional Flows)	66
4.3.2 稳定流动和非稳定流动 (Steady and Unsteady Flows)	67
4.3.3 均匀流动和非均匀流动 (Uniform and Nonuniform Flows)	67
4.3.4 流场的几何描述(Geometric Description of a Fluid Field) ...	67
4.4 层流和湍流(Laminar and Turbulent Flow)	72
4.4.1 雷诺实验(Reynolds' Experiment)	72
4.4.2 雷诺数(Reynolds Number)	73
4.5 流体微团的运动分析(Fluid Element Kinematics)	74
4.5.1 平动和线变形(Translation and Linear Deformation) ...	75
4.5.2 角变形运动(Angular Motion and Deformation)	76
4.5.3 旋转运动(Rotation)	77
4.6 流体的无旋流动和旋涡流动(Irrotational Flow and Rotational Flow)	78
4.6.1 无旋流动(Irrotational Flow)	78
4.6.2 旋涡流动(Rotational Flow)	79

工程实例	81	5.6.2 伯努利方程(Bernoulli Equation)	101
习题	82	5.6.3 总流的能量方程(The Energy Equation for Total Flows of Real Fluids)	102
第 5 章 流体动力学 I (Fluid Dynamics I)	85	工程实例	106
5.1 控制体和系统(Control Volume and System)	87	习题	107
5.2 雷诺输运定理(The Reynolds Transport Theorem)	88	第 6 章 流体动力学 II (Fluid Dynamics II)	113
5.3 连续性方程(The Continuity Equation)	91	6.1 连续性方程(Continuity Equation) ...	114
5.3.1 连续性方程的推导(Derivation of the Continuity Equation) ...	91	6.2 粘性流体的运动微分方程(Differential Form of Equations of Motion)	116
5.3.2 连续性方程的特殊形式(The Application of the Continuity Equation)	91	6.2.1 运动方程的推导(Derivation of the Continuity Equation)	116
5.3.3 运动但不变形控制体(Moving, Non-deforming Control Volume)	94	6.2.2 纳维-斯托克斯方程(Navier-Stokes Equation)	118
5.4 动量方程(The Momentum Equation)	95	6.3 葛罗米柯-斯托克斯方程(Gromeco-Stokes Equation)	124
5.4.1 惯性系中的动量方程(The Momentum Equation in Inertial Coordinate Systems)	95	6.4 理想流体流动(Inviscid Flow) ...	125
5.4.2 非惯性系中的动量方程(The Momentum Equation in Noninertial Coordinate Systems)	96	6.4.1 欧拉运动微分方程(Euler's Equations of Motion)	125
5.5 角动量方程(The Angular Momentum Equation)	97	6.4.2 伯努利方程(Bernoulli Equation)	126
5.5.1 惯性系中的角动量方程(The Angular Momentum Equation in Inertial Coordinate Systems)	97	6.4.3 无旋流动的伯努利方程(Bernoulli Equation for Irrotational Flow)	126
5.5.2 非惯性系中的角动量方程(The Angular Momentum Equation in Noninertial Coordinate Systems)	98	6.4.4 速度势函数(The Velocity Potential)	127
5.6 能量方程(The Energy Equation) ...	99	6.5 平面势流(Plane Potential Flows)	128
5.6.1 能量方程的推导(Derivation of the Energy Equation)	99	6.5.1 流函数(The Stream Function)	128
		6.5.2 基本平面势流(Some Basic Plane Potential Flows) ...	130
		6.6 简单势流的叠加(Combination of Simple Potential Flows)	134
		6.6.1 偶极流(Double Flow) ...	135
		6.6.2 螺旋流(Spiral Flow)	137
		6.7 流体对圆柱体的无环量绕流(Zero-circulation Flow around a Circular Cylinder)	138





6.8	流体对圆柱体的有环量绕流 (Flow with a free Vortex around a Circular Cylinder)	143
6.9	流体绕圆球的流动(Flow around a Ball)	147
	工程实例	151
	习题	152
第7章	相似原理与量纲分析(Similitude and Dimensional Analysis) ...	155
7.1	相似原理(Similitude)	156
7.1.1	相似概念(The Concept of Similitude)	157
7.1.2	相似条件(The Conditions of Similitude)	157
7.2	量纲分析(Dimensional Analysis) ...	160
7.2.1	量纲和谐原理 (Principle of Dimensional Homogeneity)	160
7.2.2	量纲分析的方法(Methods of Dimensional Analysis)	161
7.3	模型试验(Modeling)	164
7.3.1	全面力学相似模型试验 (Modeling under Completely Dynamic Similarity)	164
7.3.2	近似模化法(Approximately Modeling)	165
7.3.3	方程分析法(The Method to Derive Dimensional Products from Equations)	168
	工程实例	170
	习题	170
第8章	不可压缩流体的内部流动 (Internal Flow of Incompressible Fluids)	173
8.1	流体在圆管中的层流流动(Laminar Pipe Flow)	174
8.2	间隙中的层流流动(The Laminar Flow in a Clearance)	177
8.2.1	平行平板间隙流动(Flows in the Clearance between two Parallel Plates)	178
8.2.2	倾斜平板间隙流动(Flows in the Clearance between Tilting Plates)	180
8.2.3	圆柱环形间隙流动(Cylind- rical Circulation Clearance Flow)	182
8.3	入口段与充分发展段的管内流动 (Entrance Region and fully Develo- ped Flow)	183
8.4	流体在圆管中的湍流流动 (Turbulent Pipe Flow)	184
8.4.1	基本概念(Basic Concepts) ...	184
8.4.2	湍流流动的速度分布和 切应力分布(Distribution of Turbulent Velocity and Shear Stress)	187
8.5	管流水头损失(Head Losses in Pipe Flow)	191
8.5.1	水头损失的基本概念(Basic Concepts of Head Loss) ...	191
8.5.2	沿程水头损失(Head Loss along the Length)	192
8.5.3	局部水头损失(Local Head Loss)	193
8.6	沿程损失系数和局部损失系数(Loss Factor along the Length and Local Loss Factor)	194
8.6.1	沿程损失系数(Loss Factor along the Length)	194
8.6.2	局部损失系数(Local Loss Factor)	197
8.7	孔口和管嘴恒定自由出流(The Steady free Outflow through Orifice and Nozzle)	201
8.7.1	薄壁小孔口恒定自由 出流(The Steady free Outflow through Small Orifice located on Thin Wall)	201
8.7.2	圆柱外伸管嘴恒定自由 出流(The Steady free Outflow through Cylinder Outer Nozzle)	203

工程实例	208	9.6.1 斯托克斯阻力系数(Stokes Drag Coefficient)	234
习题	209	9.6.2 颗粒在静止流体中的自由沉降(Sedimentation of Particles in Static Fluid)	238
第9章 不可压缩粘性流体的外部流动 (External Flow of Incompressible Viscous Fluids)	214	9.7 粘性流体绕流物体的阻力(Drag of round Flow)	240
9.1 边界层概念(Concepts of Boundary Layer)	215	9.7.1 摩擦阻力和压差阻力(Friction Drag and Pressure Drag)	240
9.1.1 基本概念 (Basic Concepts)	215	9.7.2 减少粘性流体绕流物体阻力的措施(Ways to Prevent Drag)	241
9.1.2 边界层的基本特征(Characteristics of Boundary Layer) ...	217	9.7.3 粘性流体绕流物体的升力 (Lift of Round Flow) ...	242
9.2 边界层微分方程(Differential Equations of Boundary Layer)	219	工程实例	243
9.3 边界层动量积分方程(Momentum Integral Equation of Boundary Layer)	222	习题	243
9.4 平板边界层的近似计算(Approximately Calculation of Boundary Layer on a Flat Plate)	224	第10章 可压缩流体的一维流动(One Dimensional Compressible Flow)	245
9.4.1 层流边界层的近似计算 (Approximately Calculation of Laminar Boundary Layer) ...	224	10.1 音速和马赫数(Speed of Sound and Mach Number)	246
9.4.2 湍流边界层的近似计算(Approximately Calculation of Turbulent Boundary Layer)	226	10.1.1 音速(Speed of Sound) ...	246
9.4.3 混合边界层的近似计算(Approximately Calculation of Mixed Boundary Layer)	227	10.1.2 马赫数(Mach Number) ...	248
9.4.4 层流边界层和湍流边界层的特性对比(Characteristics of Laminar Boundary Layer against the Turbulent One)	229	10.1.3 微弱扰动波的传播 (Diffusion of Weak Perturbation Wave)	249
9.5 沿曲面的边界层及分离现象(Boundary Layer on a Curved Surface and its Separation)	230	10.2 气体一维定常流动的基本方程 (Basic Equations of the Steady One-dimensional Flow of Gases)	250
9.5.1 绕曲面流动边界层的分离 (Separation of Boundary Layer on a Curved Surface)	230	10.2.1 连续性方程(The Continuity Equation)	251
9.5.2 卡门涡街(Karman Vortex Street)	232	10.2.2 能量方程(The Energy Equation)	251
9.6 粘性流体绕小圆球的蠕流流动 (Creepage of Viscous Fluid around a small Ball)	234	10.2.3 运动方程(The Motion Equation)	252
		10.3 气体一维定常等熵流动的基本特性(Characteristics of the Steady One-dimensional Isentropic Flow of Ideal Gases)	252
		10.3.1 滞止状态(Stagnation State)	253



10.3.2	临界状态(Critical State)	253	11.2.4	热线(膜)风速仪(Hot Wire or Film Anemometer)	277
10.3.3	极限状态(Limitation State)	254	11.2.5	激光多普勒测速仪(Laser Doppler Velocimeter)	279
10.4	喷管中的等熵流动(Isentropic Flow in Converging-diverging Duct)	255	11.3	流量的测量(Measurement of Flowrate)	280
10.4.1	气流参数与截面的关系(Effect of Variations in Flow Cross-sectional Area) ...	255	11.3.1	体积(质量)流量计(Volume or Mass Flow Meter) ...	280
10.4.2	喷管(Converging-diverging Duct)	256	11.3.2	文丘里流量计(Venturi Flow Meter)	280
10.5	有摩擦等截面管内的绝热流动(Adiabatic Constant Area Duct Flow with Friction)	258	11.3.3	喷嘴流量计和孔板流量计(Nozzle Flow Meter and Orifice Flow Meter)	281
10.6	激波及其形成(Shock Waves and its Formation)	262	11.3.4	涡轮式流量计(Turbine Meter)	282
10.6.1	马赫波(Mach Wave) ...	262	11.3.5	电磁式流量计(Electromagnetic Type Flow Meter)	283
10.6.2	激波的形成(Formation of Shock Waves)	262	11.3.6	容积式流量计(Volumetric Flowmeter)	283
10.6.3	斜激波、正激波和脱体激波(Oblique, Normal and Detached Shock Wave) ...	263	工程实例	284	
工程实例	264	习题	285		
习题	265				
第 11 章 流体的测量(Fluid Measurements)		267	第 12 章 计算流体力学简介(Synopsis of CFD)		286
11.1	压强的测量(Measurement of Pressure)	268	12.1	计算流体力学概述(Overview of CFD)	287
11.1.1	静压的测量(Measurement of Static Pressure)	269	12.1.1	概述(Overview)	287
11.1.2	压强测量仪表(Measuring Instruments of Pressure)	270	12.1.2	计算流体力学研究的基本思路与方法(Basic Thought and Methods of CFD)	288
11.1.3	动态压强的测量(Measurement of Dynamic Pressure)	273	12.2	控制方程(Governing Equations)	290
11.2	流速的测量(Measurement of Velocity)	275	12.2.1	概述(Overview)	290
11.2.1	总压管(Stagnation Pressure Tube)	275	12.2.2	边界条件(Boundary Conditions)	294
11.2.2	皮托管(Pitot Tube) ...	276	12.2.3	控制方程的数学特性(Mathematical Behavior of Governing Equations)	294
11.2.3	三孔圆柱形探针(Triporate Cylindrical Probe)	277	12.2.4	控制方程的离散化(Discretization of Governing Equations)	295

12.3 有限差分法(Method of Finite Differences)	296	12.5.1 无旋流动的差分计算 (Difference Calculation of Irrotational Flow)	301
12.3.1 有限差分法的概念(Aspects of Finite Differences) ...	296	12.5.2 平板边界层的差分解法 (Difference Calculation of Boundary Layer on a Flat Plate)	302
12.3.2 相容性、收敛性和稳定性 (Consistency, Stability and Convergence)	298	12.6 有限体积法(Finite Volume Method)	302
12.4 模型方程的差分格式 (Discretization Schemes of Model Equations)	299	12.6.1 有限体积法及其网格简介 (FVM and its Grids) ...	302
12.4.1 波动方程(Fluctuation Equations)	299	12.6.2 求解一维稳态问题的有限体积 法(FVM Solution of One-dimen- sional Steady Flow)	303
12.4.2 热传导方程(Equations of Heat Conduction)	300	12.7 常用的 CFD 商用软件简介 (Synopsis of Common Used CFD Software)	305
12.4.3 无粘性伯格方程 (Burgers Inviscid Equations)	300	工程实例	308
12.5 几种流动的差分计算方法 (Difference Calculations of some Flows)	301	习题	309
		参考文献(References)	310



第 1 章

绪论(Introduction)



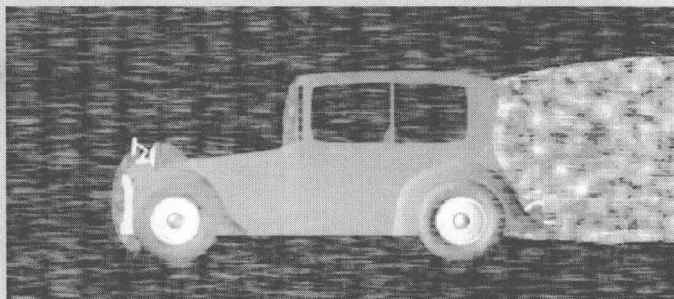
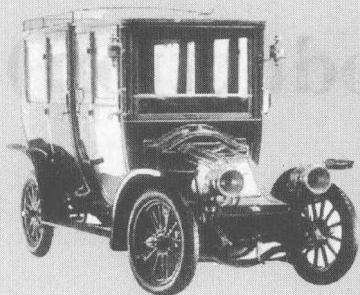
知识要点	能力要求	相关知识
流体力学的研究内容和方法	掌握流体力学的研究内容和方法	流体力学的基本任务；流体力学研究的对象；流体力学研究的方法
流体力学发展简史	了解流体力学的重大历史事件和研究流体力学的重要历史人物及其相关的重大理论	流体力学的中国史和西方史
流体的连续介质模型	掌握流体质点和连续介质模型的概念	流体的定义；流体质点的定义；流体的分类；连续介质模型的定义；连续介质模型的意义
量纲和单位	理解量纲与单位的定义；掌握国际单位制的基本单位；掌握量纲与单位的关系	量纲与单位的定义；基本量纲与导出量纲；基本单位与导出单位；流体力学的常用单位
作用在流体上的力	掌握作用在流体上的力的分类和表达形式；掌握单位质量力的定义	质量力；表面力



导入案例

汽车发明于19世纪末,当时人们认为汽车的阻力主要来自前部对空气的撞击,因此早期的汽车后部是陡峭的,称为箱型车,阻力系数 C_D 很大,约为0.8。

实际上,汽车阻力主要来自后部形成的尾流,称为形状阻力。



1.1 流体力学的研究内容和方法 (Scope of Fluid Mechanics)

流体力学是以流体为研究对象的力学,是研究流体平衡和运动规律的一门科学,是力学的一个重要分支。流体包括液体和气体。

➤ Fluid mechanics is concerned with the behavior of liquids and gases at rest and in motion.

流体力学的应用领域非常广泛,它是用来解释大气流动、河水流动、龙卷风等自然现象的科学,也是用来解决众多工程问题的科学。许多有趣的问题可以用比较简单的流体力学的原理来阐释,比如下面的情况。

(1) 为什么将飞机的外表面做成光滑的流线型,而将高尔夫球的外表面做成粗糙的表面?

(2) 汽车阻力来自前部还是尾部?

(3) 在没有空气产生反推力的外层空间,火箭是怎样产生推力的?

(4) 如何根据从模型风机上获得的数据信息来制造实际飞机?

(5) 通过改善汽车的空气动力学设计,消耗每升汽油的行使里程能够增加到多少?

流体力学的基本任务是建立描述流体运动的基本方程,确定流体经各种通道及绕流不同物体时速度、压强的分布规律,探求能量转换及各种损失的计算方法,并解决流体与限制其流动的固体壁之间的相互作用问题。

流体力学按其研究内容侧重方面的不同,分为理论流体力学(通称为流体力学)和应用流体力学(通称为工程流体力学)。前者主要采用严密的数学推理方法,力求准确性和严密性。后者则侧重于解决工程实际中出现的问题,而不去追求数学上的严密性。当然,由于流体运动的复杂性,在一定程度上,两种方法都必须借助于实验研究,得出经验或半经

验的公式。

在实际工程的许多领域里,流体力学一直起着十分重要的作用。无论是水利工程、动力工程、航空工程,还是化学工程、机械工程等都在日益广泛地应用着流体力学。就某种意义而言,也正是在流体力学的研究工作不断取得成就的前提下,才促进了这些工程领域的大力发展。

流体力学的研究对象包括液体和气体,它们统称为流体。流体力学研究的是流体中大量分子的宏观平均运动规律,而不是其具体的分子运动。

工程流体力学主要讲述流体力学的基本概念、基本理论及其在工程实际中的应用。本教材是动力类各专业的教学用书,其研究内容以不可压缩流体的流动为主,对可压缩流体,只对其基本理论作必要的阐述。

由于在各种热力动力设备中主要采用水、汽、空气、油、烟气等流体作为工作介质,因此,只有掌握了流体的基本运动规律,才能真正地了解这些设备的性能和运行规律,才能正确地从事这些设备的设计和运行。所以,工程流体力学是动力类各专业的主要专业基础课程之一。

流体力学作为一门技术科学,研究方法也遵循“实践—理论—实践”的基本规律。其研究过程可大致分为以下步骤:①对自然界和生产实践中出现的流体力学现象进行观察,从中抽出共性问题进行研究;②对自然现象和实践问题进行研究、认识,从中找出主要因素,忽略次要因素,建立抽象的数学模型;③对数学模型进行理论分析和实验研究,总结并验证基本规律,形成理论;④以得到的基本理论去指导和预言实践,并在实践中检验、修正理论使其完善。

1.2 流体力学发展简史(Historical Sketch of the Development of Fluid Mechanics)

人类为了生存,自远古以来一直持续不断地与自然界进行着不懈的斗争。流体力学同其他自然科学一样,是在长期的生产实践和科学研究中逐渐被人们认识和总结,发展成为自然科学的一个重要分支的。正如奥地利物理学家汉斯·蒂林格在《从牛顿到薛定谔的理论物理学之路》一书中写道:“每一门科学都是用世代代的研究者无数努力的代价建立起来的大厦。”古今中外许许多多从事流体力学问题的研究者,如同卓越的建筑师,用自己的聪明才智和辛勤劳动的汗水筑成了完整的流体力学“大厦”。人们最早对于有关流体知识的认识是从治水、灌溉、航行等方面开始的。

1. 流体力学在中国

我国人民对流动的认识可以追溯到四千多年前的大禹治水。大禹治水的记载说明我国古代已有大规模的治河工程。在秦代,公元前 256 年—公元前 210 年间便修建了都江堰、郑国渠、灵渠 3 大水利工程,说明我们的祖先当时对明槽水流和堰流流动规律的认识已经达到了相当高的水平。西汉武帝时期,为引洛水灌溉农田,他们在黄土高原上修建了龙首渠,创造性地采用了井渠法,即用竖井沟通长十余里的穿山隧洞,有效地防止了黄土的塌方。北宋(960—1126)时期,在运河上修建的真州船闸与 14 世纪末荷兰的同类船闸相比,



约早了三百多年。明朝的水利家潘季顺(1521—1595)提出了“筑堤防溢,建坝减水,以堤束水,以水攻沙”和“借清刷黄”的治黄原则,并著有《两河管见》、《两河经略》和《河防一揽》。

在古代,以水为动力的简单机械也有了长足的发展,例如用水轮提水,或通过简单的机械传动去碾米、磨面等。东汉杜诗任南阳太守时(公元37年)曾创造水排(水力鼓风机),即利用水力,通过传动机械,使皮制鼓风囊连续开合,将空气送入冶金炉,较西欧约早了一千一百年。

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。

必须指出的是,从14世纪欧洲文艺复兴时期开始,西方涌现出了一大批学者,他们对流体力学理论的形成作出了重要贡献,但是我国在科学技术方面已经逐渐落后了。

进入20世纪,我国出现了几位重要的科学家,他们对流体力学的发展作出了贡献。钱学森(1911—2009)在火箭、导弹、航天器等领域为中国火箭导弹和航天事业的创建与发展作出了杰出的贡献。周培源(1902—1993)在流体力学中的湍流理论方面取得了出色的成果。吴仲华在1952年发表的《在轴流式、径流式和混流式亚声速和超声速叶轮机械中的三元流普遍理论》和在1975年发表的《使用非正交曲线坐标的叶轮机械三元流动的基本方程及其解法》两篇论文中所建立的叶轮机械三元流理论,至今仍是国内外许多优良叶轮机械设计计算的主要依据。

2. 流体力学的西方发展史

在西方最早从事流体力学现象研究的学者是希腊哲学家阿基米得(Archimedes, 公元前287年—公元前212)。他在公元前250年写成的《论浮体》一书中提出了流体静力学的基本定律,这是人类历史上最早的水力学著作。正是从这时起,流体流动才开始发展成为一门独立的学科。

在以后的一段较长的历史时期中,没有记载关于流体力学发展的有关资料。

直到15世纪末,著名的物理学家和艺术家列奥纳多·达·芬奇(Leonardo Da Vinci, 1452—1519)在米兰附近设计和建造了世界上第一个小型水渠。同时,他还比较系统地研究了沉浮问题、孔口出流、物体运动阻力、流体在管路和水渠中的流动等问题,从而为水利工程和流体力学问题的研究开辟了一个新的时代。

达·芬奇时代以后,流体力学得到了飞速的发展。斯蒂文(S. Stevin, 1548—1620)在其《流体静力学基础》中对固体排水的阿基米得原理给出了一个自然的解释,是自阿基米得以后流体力学方面的第一篇系统的著述。1612年伽利略(G. Galileo, 1564—1642)在他的论文中建立了沉浮的基本理论。1643年托里拆利(E. Torricelli, 1608—1647)论证了孔口出流的基本规律。1650年帕斯卡(B. Pascal, 1623—1662)建立了流体中压力传递的基本定律。整个流体静力学部分就是由斯蒂芬、伽利略和帕斯卡等人在这段时期建立的。

英国伟大的数学家、物理学家、天文学家和自然哲学家牛顿(I. Newton, 1642—1727)于1686年建立了牛顿内摩擦定律。瑞士科学家、数学家伯努利(D. Bernoulli, 1700—1782)在1738年出版的名著《流体动力学》中,建立了流体位势能、压强势能和动能之间的能量转换关系——伯努利方程。瑞士数学家欧拉(L. Euler, 1707—1783)于1755年发表了《流体运动的一般原理》,他提出了流体的连续介质模型,建立了连续性微分方

程和理想流体的运动微分方程,给出了不可压缩理想流体运动的一般解析方法,提出了研究流体运动的两种不同方法及速度势的概念,并论证了速度势应当满足的运动条件和方程,他被称为经典流体力学的奠基人。1744年法国著名的物理学家、数学家和天文学家达朗伯(J. le R. D'Alembert, 1717—1783)提出了达朗伯疑题(又称达朗伯佯谬, D'Alembert paradox),即在理想流体中运动的物体既没有升力也没有阻力,他从反面说明了理想流体的局限性。基本在同一时期,法国数学家、物理学家拉格朗日(J. L. Lagrange, 1736—1813)提出了新的流体动力学微分方程,使流体动力学的解析方法有了进一步发展,他严格地论证了速度势的存在,并提出了流函数的概念,为应用复变函数去解析流体定常的和非定常的平面无旋运动开辟了道路。这些学者的突出贡献为流体动力学的建立准备了先决条件。

从16世纪到18世纪这段时期,有关流体力学方面的理论大都是对自然现象和实验的总结。某些理论与实际之间还存在着很大的差异,甚至完全相反。如达朗伯(D'Alembert)提出,当物体在理想流体中运动时,没有对运动的阻力。而实验证明,这个结论是不正确的。由于理论分析和实验研究两种方法的侧重不同,从这个时期起在流体流动问题的研究中开始分成了两个体系:一个是以严密的数学推论为主,从理论上处理问题,称为“理论流体力学”或“流体力学”;另一个是以液体流动实践及实验研究为主,侧重于解决工程实际问题,称为“水力学”。与此同时,还派生出另一门重要的学科——“空气动力学”。

1821年法国科学家纳维(C. L. M. H. Navier, 1785—1836)首先提出了不可压缩粘性流体的运动微分方程组。该方程在1845年由英国数学家、物理学家斯托克斯(G. G. Stokes, 1819—1903)严格地导出,并把流体质点的运动分解为平动、转动、均匀膨胀或压缩及由剪切所引起的变形运动。后来引用时,人们便统称该方程为纳维-斯托克斯方程。纳维-斯托克斯方程奠定了粘性流体动力学的基础。

从19世纪开始,实验研究在流体力学发展中的作用得到了显现,并取得了许多成果。弗劳德(W. Froude, 1810—1879)通过对船舶阻力和摇摆的研究,提出了船模试验的相似准则数——弗劳德数,建立了现代船模试验技术的基础。雷诺(O. Reynolds, 1842—1912)在1883年用实验证实了粘性流体的两种流动状态——层流和湍流的客观存在,找到了实验研究粘性流体流动规律的相似准则数——雷诺数,以及判别层流和紊流的临界雷诺数,为流动阻力的研究奠定了基础。英国学者瑞利(L. J. W. Reyleigh, 1842—1919)在相似原理的基础上,提出了实验研究的量纲分析法中的一种方法——瑞利法。另外在19世纪,对流动阻力的研究也取得了显著的进展,亥姆霍兹(H. von Helmholtz, 1821—1894)和基尔霍夫(G. R. Kirchhoff, 1824—1887)通过对旋涡运动和分离流动的大量理论分析和实验研究,取得了表征旋涡基本性质的旋涡定理、带射流的物体绕流阻力等学术成就。

进入20世纪,对流动阻力的深入研究使空气动力学的理论日益完善,并促进了航空和航天科技的发展。1902年库塔(M. W. Kutta, 1867—1944)提出了绕流物体上的升力理论。1906年以后茹科夫斯基(Zhukovskiy, 1847—1921)发表了《论依附涡流》等论文,找到了翼型升力和绕翼型的环流之间的关系,建立了二维升力理论的数学基础,他的研究成果对空气动力学的理论和实验研究都有重要贡献,也为近代高效能飞机设计奠定了基础。1904年德国物理学家普朗特(L. Prandtl, 1875—1953)建立了边界层理论,解释了阻力产



生的机制,此后他又针对航空技术和其他工程技术中出现的紊流边界层,提出混合长度理论,并于1918—1919年间,论述了大展弦比的有限翼展机翼理论,由于这些理论成果的重要贡献,普朗特被称为现代流体力学之父。

20世纪对流动阻力的深入研究,还催生了一系列流动阻力的计算理论,并促进了流体机械、动力机械等领域理论的发展。卡门(T. von Karman, 1881—1963)在1911—1912年连续发表的论文中,提出了分析带旋涡尾流及其所产生的阻力的理论,人们称这种尾涡的排列为卡门涡街。他在1930年的论文中还提出了计算湍流粗糙管阻力系数的理论公式。布拉休斯(H. Blasius)在1913年发表的论文中,提出了计算湍流光滑管阻力系数的经验公式。尼古拉兹(J. Nikuradze)在1933年发表的论文中,公布了他对砂粒粗糙管内水流阻力系数的实测结果——尼古拉兹曲线,据此他还给湍流光滑管和湍流粗糙管的理论公式选定了应有的系数。科勒布茹克(C. F. Colebrook)在1939年发表的论文中,提出了把紊流光滑管区和湍流粗糙管区联系在一起的过渡区阻力系数计算公式。莫迪(L. F. Moody)在1944年发表的论文中,给出了他绘制的实用管道的当量糙粒阻力系数图——莫迪图。至此,有压管流的水力计算已渐趋成熟。另外,伯金汉(E. Buckingham)在1914年发表的《在物理的相似系统中量纲方程应用的说明》论文中,提出了著名的 π 定理,进一步完善了量纲分析法。

从19世纪到20世纪,由于生产力的迅速增长和工业生产的蓬勃发展,大大地加速了流体力学和水力学的发展。许多新兴的工业领域要求人们提供的不仅是水,还有其他多种流体流动的研究结果。研究手段不仅包括理论研究,也包括实验研究,其发展趋势是多方面的结合。在这种结合的过程中,量纲分析和相似原理起着重要的作用。在这一阶段中取得重要成就的典型代表有:①纳维-斯托克斯方程,奠定了粘性流体动力学的基础;②雷诺根据实验得出的重要结果指出了流动在客观上存在的两种状态——层流和湍流,找出了判别流态的重要参数——雷诺数,从而为流动的阻力与损失研究奠定了基础;③瑞利的量纲分析和雷诺的相似理论解决了流体力学中大量的关键性问题,为理论分析和实验研究开辟了渠道;④在解决流体力学问题中,佛鲁德、雷诺等人建立了一系列的数学模型,为相似理论在流体力学中的应用开辟了更为广泛的途径;⑤普朗特引进了边界层的概念,建立了理想流体和实际流体研究之间的联系;⑥普朗特、茹可夫斯基等研究了机翼和绕流理论,奠定了现代空气动力学的基础。

从20世纪中叶以后的科学技术发展来看,各工业部门的种类日趋复杂,技术问题更趋向于专门化。因此,流体力学必将分离出一系列的独立学科。目前已逐步形成的有电磁流体力学,两相流体力学,流变流体力学,高、超声速气体动力学和稀薄气体动力学等。

现代流体动力学的发展趋向于更为宽广的范围。尤其是数值计算和计算机技术的引入,使以前因过于繁杂的计算而影响进一步探讨的流体力学问题逐步得以解决,并形成了流体力学的一个新分支——计算流体力学,使流体力学成为医学、气象学、宇宙航行、海洋学以及各种工程技术的重要组成部分。

1.3 流体的连续介质模型(Continuum Assumption of Fluids)

流体是指易于流动的物体。就其力学行为来讲,流体可以承受很大的压力,但几乎不