

清华大学出版社“十三五”重点规划教材

物理流体力学

Physical
Hydrodynamics

王先智 编著

清华大学出版社

物理流体力学

Physical
Hydrodynamics

王先智 编著

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书把流体力学看成牛顿第二定律对流体连续介质的应用,尽可能用熟悉的物理概念和现象作类比,启发式讲述流体力学的基本概念和基本思想,不追求过深的数学分析。对于理想流体,主要内容包括欧拉方程、伯努利方程、涡量方程、无旋流动的拉普拉斯方程、布拉休斯定理、二维机翼升力理论、表面张力-重力波和声波等。对于黏性流体,主要内容包括纳维-斯托克斯方程及其严格解、涡量方程、流体热传导方程、斯托克斯阻力公式、黏性流体的振荡运动和普朗特边界层理论等。本书内容丰富,讲解了大量流体力学的应用,配有较多的例题和习题,并且例题的解答很详细,比较难的习题给出了解答提示。

本书可以用作物理、数学和力学专业本科生的教材和教学参考书,也可以用作工科相关专业本科生的教学参考书,以及供相关专业的研究生参考用书。

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

物理流体力学/王先智编著. —北京:清华大学出版社,2018

ISBN 978-7-302-50978-3

I. ①物… II. ①王… III. ①物理力学—流体力学—高等学校—教材 IV. ①O35

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 189072 号

责任编辑:鲁永芳

封面设计:常雪影

责任校对:赵丽敏

责任印制:沈 露

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:北京国马印刷厂

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm

印 张:17

字 数:410 千字

版 次:2018 年 12 月第 1 版

印 次:2018 年 12 月第 1 次印刷

定 价:49.00 元

产品编号:077164-01

序 言

PREFACE

虽然市面上已有不少有关流体力学的教材和专著,但这些流体力学书要么是针对工科专业的,要么是针对力学和数学专业的,却很少有针对物理专业本科生的。针对物理专业的本科生学习使用的流体力学教材,一方面要求有物理思想,另一方面数学不能太难。例如著名的朗道-栗弗席兹(Landau-Lifshitz)流体力学,虽然充满了物理见解,但很多是靠物理直觉写出的,推导细节没有给出,精深难懂,对于初学者很难理解。

我曾经为上海交通大学物理与天文系物理专业本科生上过几年“流体力学”课,编写过讲义,本书是在此讲义的基础上经过扩充而成的。

二十多年的本科教学经验告诉我,教材和教学参考书不同于学术专著。学术专著的读者对象主要是专业研究人员,他们的基础知识雄厚,研究经验丰富,所以学术专著的特点是严谨、准确、高度专业化。而教材和教学参考书的读者对象主要是本科生和研究生,他们的基础比较薄弱,因此教材和教学参考书一定要循序渐进、通俗易懂、启发式阐述,而且要求配有一定数量的例题和习题。在这方面,著名物理学家费恩曼的《费恩曼物理学讲义》用那么通俗的语言讲述物理给我留下了极其深刻的印象。尤其是上过几年工科大学物理课以后,我明白了要用尽可能通俗简单的语言给本科生讲述物理。本书就是沿着这一思路编著的,把流体力学看成牛顿第二定律对流体连续介质的应用,深入浅出地讲述流体力学的基本概念,尽可能用熟悉的物理概念和现象作类比,避免过于复杂的数学分析。

本书内容循序渐进、从易到难,并没有从一开始就建立黏性流体力学的基本方程。而是从回忆牛顿力学中质点的运动描述出发,通过把流体分解为无穷多个微元,引进拉格朗日描写和欧拉描写,根据牛顿力学中质点的速度和加速度的定义引进随体导数。然后考虑理想流体,分析流体微元受力并应用牛顿第二定律推导欧拉方程。把欧拉方程写成积分形式,得到伯努利方程。进一步讲述欧拉方程和伯努利方程的应用。待读者有了一定的流体力学知识之后,再建立黏性流体力学的基本方程。

本书利用涡量的散度恒为零与磁感应强度的散度恒为零(磁场高斯定理)这一类似性,得到涡量与磁感应强度之间的类比关系,从大学物理讲的磁感应线、磁感应面、磁感应管和磁通量,通过类比定义涡线、涡面、涡管和涡通量,从磁感应线管磁通量守恒定理通过类比证明涡管涡通量守恒定理。本书利用不可压缩流体的速度的散度恒为零(连续性方程)与磁感应强度的散度恒为零(磁场高斯定理)这一类似性,通过类比证明大学物理中的稳恒细电流感生磁感应强度的毕奥-萨伐尔定律和涡丝感生速度公式等效,安培环路定理和速度环量公式(斯托克斯定理)等效,从而进一步证明兰金组合涡的速度分布等效于无限长均匀圆柱电

流感生的磁感应强度分布,涡层感生的切向速度间断面等效于面电流感生的切向磁感应强度间断面。由于电势和速度势均遵守拉普拉斯方程,导体尖端放电时尖端附近的电场和翼型启动时尖尾缘附近的流体速度遵守相同的空间变化规律,从导体尖端放电现象通过类比理解翼型尖尾缘附近流体的运动。从牛顿平板实验结果出发作逻辑推理得到广义牛顿黏性定律。使用牛顿力学中的质点系的动量定理解释流体力学的动量平衡方程各项的物理意义。使用牛顿力学中的质点系的动能定理和功能原理解释流体力学的能量平衡方程各项的物理意义,特别是流体的能量耗散项的物理意义。

本书具有一定的大学物理味道,非物理专业的本科生只要学过大学物理后,就可以看懂大部分章节。为此,本书尽可能对公式给出详细的推导过程。配有较多插图,尽可能用图来表示物理思想和过程。配有较多的例题和习题,并且例题的解答很详细,比较难的习题都有解答提示。因此虽然本书是为物理专业的本科生写的,对数学专业、力学专业和工科等相关专业的本科生同样有参考价值。

在网络时代,网络资料是必不可少的参考资料。在撰写本书时,我参考了一些网络资料,但无法找到作者名字,在这里向这些无名作者表示感谢。

王先智

目 录

CONTENTS

第1章 流体力学的基本概念	1
1.1 概论	1
1.2 流体的性质	6
1.2.1 流体具有易流动性	6
1.2.2 流体中的不可逆过程	7
1.2.3 流体分类	7
1.2.4 流体运动分类	8
1.2.5 连续介质近似	8
习题	9
1.3 局域平衡假设与局域热力学方程	9
习题	12
1.4 拉格朗日描写和欧拉描写	12
1.4.1 牛顿力学中的质点运动的描述	12
1.4.2 拉格朗日描写	13
1.4.3 欧拉描写	13
1.4.4 两种方法的优缺点	14
1.4.5 从拉格朗日描写转换到欧拉描写	14
1.4.6 从欧拉描写转换到拉格朗日描写	15
1.4.7 轨迹	16
1.4.8 流线	16
1.4.9 定常流动	17
习题	19
1.5 涡量与速度环量	20
1.5.1 流体的涡旋运动的描述	21
1.5.2 磁感应线、磁感应面、磁感应管与磁通量	24
1.5.3 涡线、涡面、涡管与涡通量	25
1.5.4 速度环量	29
习题	30

1.6 连续性方程与流函数	32
1.6.1 拉格朗日描写下的连续性方程	32
1.6.2 欧拉描写下的连续性方程	32
1.6.3 不可压缩流体的二维流动与流函数	33
1.6.4 不可压缩流体的轴对称流动与斯托克斯流函数	36
习题	39
1.7 涡旋感生的速度与毕奥-萨伐尔定律	41
1.7.1 类比	41
1.7.2 涡丝感生的速度	42
1.7.3 兰金组合涡	45
1.7.4 涡层感生的速度	46
习题	48
第2章 理想流体运动方程	50
2.1 欧拉方程	50
2.1.1 为什么理想流体的研究是有用的?	50
2.1.2 欧拉方程的推导	51
2.1.3 边界条件	52
2.1.4 绝热运动方程	54
2.1.5 等熵运动	54
2.1.6 作等熵运动的理想流体的欧拉方程	54
2.1.7 流体的状态	54
习题	57
2.2 静力学方程	59
2.2.1 静力学方程的推导	59
2.2.2 阿基米德定律	62
2.2.3 星体静力学平衡方程	65
习题	67
2.3 表面张力现象与拉普拉斯公式	69
2.3.1 表面张力现象	69
2.3.2 拉普拉斯公式	70
2.3.3 曲率半径公式	71
习题	75
2.4 伯努利方程	77
2.4.1 伯努利方程的推导	77
2.4.2 理想气体的绝热运动	78
2.4.3 小孔出流	79
2.4.4 虹吸现象	81

2.4.5	皮托管	82
2.4.6	文丘里管	83
2.4.7	U形管中水的振荡	84
	习题	84
2.5	涡量方程、流函数方程与速度环量守恒定理	86
2.5.1	涡量方程	87
2.5.2	不可压缩理想流体的涡量方程	87
2.5.3	二维流动的流函数方程	87
2.5.4	轴对称流动的流函数方程	87
2.5.5	希尔球涡	88
2.5.6	速度环量守恒定理	89
	习题	91
2.6	动量平衡方程	92
2.6.1	质点系的动量定理	92
2.6.2	拉格朗日描写下的理想流体的动量平衡方程	93
2.6.3	欧拉描写下的理想流体的动量平衡方程	93
2.6.4	作用在弯管上的力	94
	习题	95
2.7	能量平衡方程	96
2.7.1	质点系的动能定理与功能原理	96
2.7.2	拉格朗日描写下的理想流体的能量平衡方程	97
2.7.3	不可压缩理想流体的任一部分的功能原理	98
2.7.4	欧拉描写下的理想流体的能量平衡方程	99
第3章	理想流体的无旋运动	100
3.1	理想流体无旋运动的出现条件	100
3.1.1	无旋运动的定义	100
3.1.2	什么情况下理想流体的运动是无旋的	100
3.1.3	为什么关于理想流体的无旋流动的研究是有用的?	101
3.2	不可压缩理想流体的无旋运动	102
3.2.1	拉普拉斯方程	102
3.2.2	伯努利方程	103
	习题	106
3.3	不可压缩理想流体的二维无旋运动	106
3.3.1	复势和复速度	106
3.3.2	驻点	107
	习题	113
3.4	达朗贝尔佯谬	115

3.4.1	不可压缩理想流体的功能原理	115
3.4.2	达朗贝尔佯谬	116
3.4.3	在不可压缩理想流体中运动的一个固体球的动力学方程	118
3.4.4	在不可压缩理想流体中运动的一个固体圆柱的动力学方程	119
	习题	120
3.5	布拉休斯定理	121
3.5.1	布拉休斯定理的推导	121
3.5.2	柯西定理	122
3.5.3	留数定理	122
	习题	125
3.6	二维机翼升力理论	125
3.6.1	牛顿阻力模型	126
3.6.2	马格纳斯效应	126
3.6.3	马格纳斯效应的解释	127
3.6.4	茹可夫斯基变换	130
3.6.5	环量的确定——茹可夫斯基假设	132
3.6.6	库塔-茹可夫斯基定理	135
3.6.7	茹可夫斯基翼型	136
3.6.8	“飞蛇”之谜	137
3.6.9	速度环量的起源	138
	习题	139
3.7	表面张力-重力波	141
3.7.1	无旋流动的条件	141
3.7.2	边界条件	142
3.7.3	二维表面张力-重力简谐行波	143
3.7.4	二维表面张力-重力简谐驻波	147
3.7.5	三维表面张力-重力简谐驻波	148
3.7.6	水渠里的长重力波	149
3.7.7	两个流体分界面上的二维表面张力-重力简谐行波	150
	习题	152
3.8	声波	155
3.8.1	波动方程	155
3.8.2	一维波动方程	156
3.8.3	一维柱形管中的驻波	157
3.8.4	球面波	157
	习题	160
第4章 黏性流体的运动		163
4.1	广义牛顿黏性定律	163

4.1.1	黏性应力张量	163
4.1.2	应力张量的对称性	164
4.1.3	广义牛顿黏性定律	165
	习题	167
4.2	纳维-斯托克斯方程	168
4.2.1	纳维-斯托克斯方程的推导	169
4.2.2	纳维-斯托克斯方程的其他形式	169
4.2.3	球坐标系	170
4.2.4	柱坐标系	171
4.2.5	边界条件	171
4.2.6	施于任意流体面元上力的公式的其他形式	172
	习题	173
4.3	涡量方程与流函数方程	174
4.3.1	不可压缩流体的涡量方程	174
4.3.2	二维流动的流函数方程	175
4.3.3	轴对称流动的流函数方程	175
4.3.4	速度环量方程	176
	习题	176
4.4	不可压缩流体的能量平衡方程与热传导方程	177
4.4.1	能量耗散	177
4.4.2	能量耗散的其他表达形式	179
4.4.3	欧拉描写下的能量平衡方程	179
4.4.4	热传导方程	180
	习题	181
4.5	平行于平面的流动和管流	182
4.5.1	牛顿平板实验	182
4.5.2	重力驱动的平行于平面的流动	184
4.5.3	压强梯度驱动的平行于平面的流动	185
4.5.4	管流问题	187
	习题	193
4.6	转动圆柱面间流体的二维圆周运动	194
4.6.1	纳维-斯托克斯方程的解	195
4.6.2	如何在实验室制造点涡?	195
	习题	196
4.7	相似法则	196
4.7.1	雷诺数、弗劳德数和施特鲁哈尔数	197
4.7.2	普朗特数	197
	习题	198

4.8 斯托克斯阻力公式	199
4.8.1 叠加法	199
4.8.2 矢量势法	202
4.8.3 流函数法	203
4.8.4 能量方法	204
习题	208
4.9 黏性流体的振荡运动	212
4.9.1 一个作缓慢的简谐振动的固体球引起的流体振荡运动	212
4.9.2 一个固体球在不可压缩流体中以任意速度运动时所受的阻力	215
4.9.3 黏性流体中的横波	218
习题	221
4.10 普朗特边界层理论	224
4.10.1 普朗特方程组	224
4.10.2 应用	226
4.10.3 卡门积分方程	228
4.10.4 兰姆近似	228
习题	229
4.11 表面张力-重力波的衰减	230
4.11.1 二维表面张力-重力简谐行波的衰减	231
4.11.2 二维表面张力-重力简谐驻波的衰减	231
4.11.3 三维表面张力-重力驻波的衰减	232
4.11.4 结论	232
习题	232
第5章 流体的微观描述	235
5.1 刘维方程及流体力学方程的推导	235
5.1.1 刘维方程	235
5.1.2 流体力学方程的推导	237
习题	241
5.2 玻尔兹曼积分微分方程	243
5.3 H 定理	246
习题	247
5.4 从玻尔兹曼方程推导流体力学方程	248
5.4.1 统计平均值	248
5.4.2 连续性方程	249
5.4.3 动量平衡方程	249
5.4.4 能量平衡方程	249
5.4.5 达到局域麦克斯韦速度分布函数时的流体力学方程	250

第1章

流体力学的基本概念

1.1 概论

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。古代中国人民在生活和实践中,积累了不少有关物体的重心、固体在流体中的沉浮、虹吸现象等知识,发明了竹蜻蜓、风筝。秦国和后来的秦朝在公元前 256 到前 210 年便修建了都江堰、郑国渠、灵渠三大水利工程,说明当时对明槽水流和堰流流动规律的认识已经达到相当水平。在西方,古希腊的阿基米德(Archimedes,公元前 287—公元前 212)是流体静力学的奠基人,建立了浮力定律和浮体稳定性理论,发明了阿基米德螺旋提水机,他的著作《论浮体》是流体静力学的第一部专著。

15 世纪,意大利著名科学家和艺术家达·芬奇(Leonardo, da. Vinci, 1452—1519)设计建造了佛罗伦萨运河网,系统地研究了物体的沉浮、孔口出流、物体的运动阻力、水波、管流、液体压力、水力机械、潜水器、扑翼机、滑翔翼、空气螺旋桨、降落伞、鸟的飞翔原理、涡旋运动、湍流等问题。1644 年托里拆利(E. Torricelli, 1608—1647)发明了气压计,发现了小孔出流速度的自由落体速度公式。1650 年帕斯卡(B. Pascal, 1623—1662)发现了帕斯卡原理,即加在密闭液体上的压强能够大小不变地由液体向各个方向传递。

但流体力学作为一门严密的科学,却是在牛顿(I. Newton, 1642—1727)建立了经典力学之后逐步形成的。1687 年,牛顿出版了划时代的著作《自然哲学的数学原理》,建立了绝对时空观,提出了质点、速度、加速度、力等概念,建立了运动三定律。1678 年,牛顿研究了物体在流体中运动时所受的阻力,得到阻力与流体密度、物体表面面积、运动速度的平方以及物体表面相对来流方向的夹角的正弦的平方成正比的关系;完成了平板实验,建立了关于流体内摩擦的牛顿黏性定律。为了给“绝对空间和运动”寻找证据,他还做了一个水桶实验,通过观察旋转水桶里的水面形状,来论证相对于绝对空间的旋转效应。牛顿还计算了空气中声音的传播速度,但他不正确地假设空气中声音的传播过程是等温过程。

牛顿建立的质点、速度、加速度、力等概念,提出的运动三定律以及黏性定律,已经为流

体力学奠定了理论基础。在此基础上,丹尼尔·伯努利(D. Bernoulli, 1700—1782)于1738年出版了《流体动力学》,将牛顿力学中的活力(能量)守恒原理引入流体力学,建立了伯努利方程。由于牛顿力学只适用于质点,不能直接用于连续介质,欧拉(L. Euler, 1707—1783)提出了流体的连续介质模型,把流体分解为无穷多个微元,把微元看成质点,把经典力学里对质点的位置描述方法推广,提出了两种方法来描述流体的运动:第一种方法要求在各个空间固定点的观察者记录下各个时刻经过的流体微元的速度,第二种方法要求观察者随各个流体微元一起运动并记录下各个时刻的位置矢量,这两种方法通常分别称为“欧拉描写”和“拉格朗日描写”。他进一步把静力学中帕斯卡原理推广到运动流体,对流体微元进行受力分析并应用牛顿第二定律,建立了理想流体的运动方程。欧拉还研究了不可压缩理想流体的无旋运动,引进了速度势,建立了速度势满足的拉普拉斯方程。拉格朗日、拉普拉斯等人继续了欧拉的研究,把无旋流动理论应用到水波、潮汐、声学等方面,取得了很多成果。特别是拉普拉斯正确地认识到空气中声音的传播过程是绝热过程,纠正了牛顿的错误。

接下来,纳维(C-L-M-H. Navier, 1785—1836)和斯托克斯(G. G. Stokes, 1819—1903)分别独立地获得了黏性流体的动量平衡方程。1821年,纳维提出了微观处理,采用离散的分子模型,从某些分子相互作用假设出发,将欧拉的理想流体的运动方程推广,获得带有一个反映黏性的常数的运动方程。1845年,斯托克斯提出了宏观处理,在论文“论运动中流体的内摩擦理论和弹性体平衡和运动的理论”中采用连续介质模型,把流体分解为无穷多个微元;把牛顿黏性定律推广,假设应力张量线性地依赖于应变率;然后将牛顿第二定律和推广后的牛顿黏性定律应用于流体微元,推导出了含有两个反映黏性常数的运动方程。至此,简单流体的动量平衡方程已经找到。19世纪下半叶以来,热力学的发展促使人们寻找简单流体的其他热力学方程。1851年,斯托克斯找到了简单流体的能量耗散公式。20世纪上半叶,随着线性不可逆热力学的发展,特别是昂色格(L. Onsager, 1903—1976)从微观的哈密顿方程的可逆性出发建立了不可逆过程的线性唯象关系中各系数间的互易关系后,人们进一步发展了简单流体的能量平衡方程和熵平衡方程。至此,简单流体的所有热力学方程已经全部建立。

1883年,雷诺(O. Reynolds, 1842—1912)通过管流实验发现了黏性流体存在层流和湍流这两种流动状态,找到了判别这两种流动状态的无量纲数——雷诺数。他进一步把纳维-斯托克斯方程作时间平均,得到了雷诺方程,为湍流的统计理论打下了基础。虽然早在500多年前,达·芬奇就已经认识到了湍流的多尺度结构,直到1941年科尔莫戈罗夫(A. N. Kolmogorov, 1903—1987)才把这一想法发展成局域各向同性湍流理论,并且受此理论的激发,近些年来科学家进一步发展了湍流的多重分形结构理论。湍流作为经典物理最后没有解决的难题,已经有了相当多的进展。

1904年,普朗特(L. Prandtl, 1875—1953)提出了边界层理论。普朗特认识到,通常情况下,流体的黏性只在靠近固体表面很薄的区域内(边界层)起主要作用。离开这个区域,黏性的影响可以忽略。在边界层区域,由于垂直于固体表面的速度分量远小于平行于表面的速度分量,纳维-斯托克斯方程可以简化为普朗特方程组。而在边界层区域之外,可以使用不可压缩理想流体的无旋流动理论来描述。

20世纪初,以库塔、恰普雷金、茹可夫斯基、普朗特等为代表的科学家,使用不可压缩理想流体的无旋流动理论建立了机翼理论。机翼理论和边界层理论的结合解决了阻力和飞机

设计问题。

对流体的描述有宏观描述和微观描述两种。以上讲的是宏观描述。1872年,玻尔兹曼(L. Boltzmann, 1844—1906)建立了稀薄气体的输运方程——玻尔兹曼积分微分方程,开创了流体的微观描述研究。20世纪以来,人们提出了各种更复杂的流体输运方程。宏观描述和微观描述各有优缺点,常常结合起来以弥补各自的局限性,相辅相成。

20世纪以来,随着相对论、量子力学的出现和技术的进步,流体力学除了向传统的简单流体方向发展外,还向等离子流体、相对论性流体、量子超流体、复杂化工流体、生物流体、大气、海洋、多相流、天体流体、介观流体和夸克-胶子等离子流体等方向发展。除了传统的解析理论方法,随着电子计算机的出现,科学家使用离散化方法把纳维-斯托克斯方程化为代数方程,然后求解,发展了数值计算方法——有限元方法和差分方法,形成了一个新的分支学科——计算流体力学。此外,还发展了水槽、风洞等实验手段。理论分析、数值计算和实验模拟这三种解决流体力学问题的行之有效的方法各有优缺点,需要把它们结合起来才能获得满意的结果。20世纪80年代以来,在宏观描述和微观描述的结合方面有了显著的进展,人们对玻尔兹曼方程中的碰撞项使用弛豫时间近似,然后把方程离散化求解,发展了晶格玻尔兹曼方法,用于计算具有复杂几何边界流体系统的流动,如介观流体、非牛顿流体、多相流、相变、化学反应、界面动力学、晶体生长等。可以预见,在未来流体力学的应用将越来越广泛。

以下是流体力学及相关科学发展的一些大事。

流体力学及相关科学大事年表

约公元前500 中国人制成了会飞的竹蜻蜓,对西方航空先驱者的影响极大。

约公元前400 墨子(约公元前468—公元前376)研究了沉浮现象、虹吸现象,认识到了浮力原理,发明了风筝。

公元前3世纪 阿基米德(Archimedes, 公元前287—公元前212)是流体静力学奠基人,发现了浮力定律(阿基米德原理);发明了阿基米德螺旋提水机。

公元前256—公元前210 中国人修建了都江堰、郑国渠和灵渠三大水利工程。

约1400 明朝的官吏万户乘坐捆绑着火箭的椅子尝试飞天,献出了自己的生命,开启了人类历史上的首次飞行。

约1500 达·芬奇(Leonardo, da. Vinci, 1452—1519)研究了水波、管流、水力机械和鸟的飞翔原理等问题。

1644 托里折利(E. Torricelli, 1608—1647)制成了气压计,提出了小孔出流公式。

1650 帕斯卡(B. Pascal, 1623—1662)提出了液体中压力传递的帕斯卡原理。

1662 玻意耳(R. Boyle, 1627—1691)建立了等温下理想气体的状态方程——玻意耳-马略特定律。

1668 马略特(E. Mariotte, 1602—1684)出版了专著《论水和其他流体的运动》,奠定了流体静力学和流体运动学的基础。

1676 马略特建立了等温下理想气体的状态方程——玻意耳-马略特定律。

1678 牛顿(I. Newton, 1642—1727)研究了在流体中运动物体所受的阻力,并建立了牛顿黏性定律。

1687 牛顿是经典力学的奠基人,出版了划时代的著作《自然哲学的数学原理》,建立了运动三定律,提出了质点、速度、加速度和力等概念,为流体力学奠定了理论基础。

1732 皮托(H. Pitot, 1695—1771)发明了测量流体压力的皮托管。

1738 丹尼尔·伯努利(D. Bernoulli, 1700—1782)出版了《流体动力学》,将力学中的活力(能量)守恒原理引入流体力学,建立了伯努利方程。

1752 达朗贝尔(J. le R. D'Alembert, 1717—1783)提出了理想流体运动的达朗贝尔佯谬。

1755 欧拉(L. Euler, 1707—1783)是理想流体力学的奠基人,发表了“流体运动的一般原理”,把静力学中帕斯卡压力定律推广到运动流体,对流体质点进行受力分析并应用牛顿第二定律,建立了理想流体的运动方程。

1763 玻尔达(J.-C. Borda, 1733—1799)进行了流体阻力试验,给出了阻力公式,开黏性流体力学研究先河。

1777 玻素(C. Bossut, 1730—1814)等完成了第一个船池船模试验,测量由已知力牵引通过水池的船模所获得的速度。

1787 查理(Jacques Alexandre Cesar Charles, 1746—1823)建立了等容时的理想气体状态方程。

1802 盖-吕萨克(J. L. Gay-Lussac, 1778—1850)建立了等压时的理想气体状态方程。

1809 凯利(G. Cayley, 1773—1858)建立了航空飞行器概念。

1822 纳维(C.-L.-M.-H. Navier, 1785—1836)使用某些分子相互作用假设建立了黏性流体的基本运动方程。

1822 傅里叶(J.-B.-J. Fourier, 1768—1830)建立了傅里叶热传导定律。

1824 卡诺(Nicolas Léonard Sadi Carnot, 1796—1832)出版了《关于火的动力》一书,提出著名的卡诺定理,指明工作在给定温度范围的热机所能达到的效率极限,这实质上已经建立起热力学第二定律,但受“热质说”的影响,他的证明方法还有错误。

1834 罗素(J. S. Russel, 1808—1882)在苏格兰的联合运河上发现了孤立波。

1839 哈根(G. H. L. Hagen, 1797—1884)和泊肃叶(J. L. M. Poiseuille, 1797—1969)研究了圆管内的黏性流动,给出了哈根-泊肃叶公式。

1842 迈耶(Julius Robert Mayer, 1814—1878)提出了能量守恒理论,认定热是一种形式,可与机械能互相转化,并且从空气的比定压热容与比定容热容之差计算出热功当量。

1845 斯托克斯(G. G. Stokes, 1819—1903)使用连续介质模型,将牛顿第二定律和牛顿黏性定律应用于流体微元,严格推导出了纳维-斯托克斯方程。

1845 亥姆霍兹(H. von Helmholtz, 1821—1894)建立了涡旋的基本概念,奠定了涡动力学基础。

1850 焦耳(James Prescott Joule, 1818—1889)的实验结果已使科学界彻底抛弃了热质说,能量守恒定律得到公认。

1850 克劳修斯(Rudolf Julius Emmanuel Clausius, 1822—1888)提出了热力学第二定律的克劳修斯表述,并在此基础上重新证明了卡诺定理。

1851 开尔文(Lord Kelvin, 1824—1907)提出了热力学第二定律的开尔文表述,并在此基础上重新证明了卡诺定理。

1851 斯托克斯研究了小球在黏性流体中的运动,推导出斯托克斯阻力公式。

- 1852 马格纳斯(H. G. Magnus, 1802—1870)发现了马格纳斯效应。
- 1854 克劳修斯根据卡诺定理提出了熵。
- 1860 亥姆霍兹建立了流体运动的速度分解定理。
- 1869 开尔文发现了理想流体的速度环量守恒定理。
- 1872 玻尔兹曼(L. Boltzmann, 1844—1906)建立了稀薄气体的输运方程——玻尔兹曼积分微分方程,开创了流体的微观研究。
- 1878 兰姆(H. Lamb, 1849—1934)出版了流体力学经典著作《流体运动的数学理论》(后改名《流体动力学》),总结了19世纪流体力学的理论成就。该书共发行了6版,到1932年为止。
- 1878 瑞利(Lord Rayleigh, 1842—1919)研究了有环量的圆柱绕流问题,发现了升力,从理论上解释了马格纳斯效应。
- 1883 雷诺(O. Reynolds, 1842—1912)完成了著名的从层流到湍流的转变实验,提出了雷诺数(索末菲于1908年命名)。
- 1887 马赫(E. Mach, 1838—1916)提出了马赫数的概念。
- 1891 兰彻斯特(F. W. Lanchester, 1868—1946)提出了速度环量概念,建立了升力理论,并发展了有限翼展理论。
- 1894 雷诺把纳维-斯托克斯方程作时间平均,提出了湍流中有关应力的概念,得到了雷诺方程。
- 1895 科特沃赫(D. J. Korteweg)和德弗里斯(G. de Vries)建立了KdV方程。
- 1901 贝纳尔(H. Benard)研究了对流传热稳定性,发现了贝纳尔腔。
- 1902 茹可夫斯基(N. E. Joukowski, 1847—1921)导出了茹可夫斯基公式,奠定了机翼理论基础。
- 1902 库塔(M. W. Kutta, 1867—1944)提出了机翼流动的库塔条件。
- 1902 瑞利建立了流体力学的量纲分析和相似理论。
- 1903 莱特兄弟(W. Wright, 1867—1912; O. Wright, 1871—1948)成功完成了人类第一次飞行。
- 1903 齐奥尔科夫斯基(K. A. Tsiolkovsky, 1857—1935)导出了火箭运动基本公式和第一宇宙速度。
- 1904 普朗特(L. Prandtl, 1875—1953)建立了边界层理论。
- 1905 普朗特建成了超音速风洞(马赫数为1.5)。
- 1910 冯·卡门(Th. von Karman, 1881—1963)建立了卡门涡街理论。
- 1908 瑞利和索末菲(A. Sommerfeld, 1868—1951)研究了平行流的稳定性,导出了索末菲方程。
- 1916—1917 查普曼(S. Chapman)和恩斯库格(D. Enskog)分别独立地求解了玻尔兹曼积分微分方程,得到了气体的黏性系数和导热率等输运系数。
- 1921 泰勒(G. I. Taylor, 1886—1975)提出了湍流统计理论的基本概念。
- 1923 泰勒研究了同心圆筒间旋转流动稳定性,发现了泰勒涡。
- 1924 爱因斯坦(A. Einstein, 1879—1955)提出了理想玻色气体的玻色-爱因斯坦凝聚,开创了量子超流体的研究。