



智能制造系列教材

流体力学与热工学

主 编：何 燕

副主编：张晓光 李红艳

周 艳 姜婕妤

电子工业出版社版权所有
盗版必究

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 · BEIJING

内 容 简 介

本书内容包括流体力学、工程热力学和传热学三大部分。流体力学部分包括流体力学概述、流体的属性、流体静力学、流体动力学、相似原理和量纲分析、黏性流体流动。工程热力学部分包括工程热力学概述、工程热力学基本概念、热力学第一定律及其应用、理想气体的性质与热力过程、热力学第二定律、水蒸气的热力性质、动力循环、制冷循环。传热学部分包括传热学概述、稳态热传导、非稳态热传导、对流传热、热辐射基础理论、辐射传热计算、换热器的传热计算。

本书可作为智能制造专业和机械工程专业的教材，也可供暖通空调等相关专业的工程技术人员参考。

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。

图书在版编目(CIP)数据

流体力学与热工学 / 何燕主编. —北京：电子工业出版社，2023.1

ISBN 978-7-121-45081-5

I. ①流… II. ①何… III. ①流体力学②热工学 IV. ①O35②TK122

中国国家版本馆 CIP 数据核字(2023)第 028697 号

责任编辑：杜 军 特约编辑：田学清

印 刷：

装 订：

出版发行：电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编：100036

开 本：787×1 092 1/16 印张：21 字数：538 千字

版 次：2023 年 1 月第 1 版

印 次：2023 年 1 月第 1 次印刷

定 价：65.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题，请向购买书店调换。若书店售缺，请与本社发行部联系，联系及邮购电话：(010) 88254888，88258888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn，盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

本书咨询联系方式：dujun@phei.com.cn。

前 言

本书是在总结青岛科技大学机电工程学院多年来“流体力学”“工程热力学”和“传热学”课程教学改革成果的基础上针对智能制造专业编写的。本书在阐述上着重以原理为基础，注重突出重点、精简内容、减少篇幅，强调对问题的分析。本书还适量增加了与智能制造有关的科研进展的内容，做到与时俱进，以适应我国教育和科技的飞速发展。

流体力学、工程热力学和传热学是热工专业的三大基础课程，内容丰富。流体力学研究流体的平衡和运动规律，并据此计算工程中所需的流体压力和速度。工程热力学主要研究热能与机械能相互转换的规律、方法及提高转化率的途径。传热学研究热量传递的规律、方法及其工程应用，以计算温度场、热流量等参数。近几年，许多院校将流体力学、工程热力学和传热学整合为一门课程。本书是将流体力学、工程热力学和传热学的经典内容，按照其内在联系和人们的认识规律，按照科学教育教学规律优化组合而成的。

全书由何燕、张晓光、李红艳、周艳和姜婕妤合编。何燕担任主编；李红艳编写流体力学部分；周艳编写工程热力学部分；张晓光、姜婕妤编写传热学部分。

限于编者水平，书中难免存在不足，恳请读者批评指正。

本书的出版得到了青岛科技大学机电工程学院（智能制造学院）、教务处的大力支持，在此表示感谢。

编者

2022 年 11 月

目 录

第1篇 流体力学

第1章 流体力学概述	1
1.1 流体力学的范畴	1
1.1.1 定义和特征	1
1.1.2 连续介质模型	1
1.1.3 研究内容	2
1.2 流体力学与生活、工程技术的关系	2
1.2.1 流体力学与生活	2
1.2.2 流体力学与工程技术	3
1.3 流体力学的发展历史	3
1.4 流体力学的研究方法	5
第2章 流体的属性	6
2.1 流体的基本属性	6
2.1.1 密度	6
2.1.2 重度	6
2.1.3 比容	7
2.1.4 气体的状态方程	7
2.2 流体的可压缩性和膨胀性	7
2.2.1 流体的可压缩性	7
2.2.2 流体的膨胀性	7
2.3 流体的黏性	8
2.3.1 黏性产生的原因	8
2.3.2 牛顿内摩擦定律	9
2.3.3 理想流体和黏性流体	10
2.4 液体的表面性质	12
2.4.1 表面张力	12
2.4.2 毛细现象	12
习题	13
第3章 流体静力学	15
3.1 静止压强的特性	15
3.2 静止流场的基本方程	16
3.2.1 流体平衡微分方程	16
3.2.2 压差方程	17

3.3 重力场中静止压强的分布	18
3.3.1 压强方程	18
3.3.2 压强分布	19
3.3.3 压强测量	19
3.4 惯性力场中的静止流体	22
3.4.1 匀加速直线运动	22
3.4.2 等角速度转动	24
3.5 静止流体作用在壁面上的力	26
3.5.1 作用在平面上的力	26
3.5.2 作用在曲面上的力	28
3.5.3 浮力及浸没物体的稳定性	30
习题	31
第4章 流体动力学	35
4.1 流体运动的描述方法	35
4.1.1 拉格朗日法	35
4.1.2 欧拉法	35
4.1.3 拉格朗日法与欧拉法的关系	36
4.1.4 物理量的时间导数(偏导数、全导数、随体导数的物理意义)	37
4.2 流场的分类	38
4.2.1 定常与非定常	38
4.2.2 均匀与非均匀	38
4.2.3 流动的维数	38
4.3 迹线、流线	39
4.3.1 迹线	39
4.3.2 流线	39
4.4 流管、流束、流量、净通量、平均流速与当量直径	41
4.4.1 流管与流束	41
4.4.2 流量与净通量	41
4.4.3 平均流速	42
4.4.4 当量直径	42
4.5 控制方程	43
4.5.1 系统和控制体	43
4.5.2 输运公式	43
4.5.3 连续性方程	45
4.5.4 动量方程	45
4.5.5 能量方程	46
习题	47
第5章 相似原理和量纲分析	51
5.1 流动的力学相似	51

5.2 动力相似准则	52
5.2.1 牛顿相似准则	52
5.2.2 重力相似准则	52
5.2.3 黏性力相似准则	53
5.2.4 压力相似准则	53
5.2.5 表面张力相似准则	54
5.3 近似的模型实验	54
5.4 量纲分析法	56
习题	58

第6章 黏性流体流动	60
6.1 流体的两种状态	60
6.2 黏性流体流动的边界层	61
6.3 管道进口段黏性流体的流动	62
6.4 圆管中黏性流体的层流流动	63
6.5 圆管中黏性流体的紊流流动	66
6.5.1 紊流光滑管情况	67
6.5.2 紊流粗糙管情况	69
6.6 黏性流体的损失	69
6.6.1 沿程损失计算	69
6.6.2 局部损失计算	71
习题	74

第2篇 工程热力学

第7章 工程热力学概述	77
7.1 热力学简介	77
7.2 热力学及涉及领域	77
7.3 工程热力学的主要研究内容及方法	78
7.3.1 工程热力学的主要研究内容	78
7.3.2 工程热力学的研究方法	78
第8章 工程热力学基本概念	79
8.1 热力系统	79
8.2 状态及状态参数	80
8.2.1 状态参数的特征	80
8.2.2 温度	80
8.2.3 压力	80
8.2.4 比体积及密度	82
8.3 平衡状态、状态方程式、坐标图	82
8.4 工质的状态变化过程	83
8.4.1 准平衡过程	83

8.4.2 可逆过程和不可逆过程	84
8.5 过程功和热量	84
8.5.1 可逆过程的功	84
8.5.2 有用功	85
8.5.3 过程热量	85
8.6 热力循环	86
习题	87
第9章 热力学第一定律及其应用	89
9.1 热力学第一定律的实质及表达式	89
9.2 闭口系统中热力学第一定律的表述	89
9.2.1 热力学能和总能	89
9.2.2 闭口系统的能量方程式	90
9.3 开口系统稳定流动的能量方程式	91
9.3.1 推动功和流动功	91
9.3.2 焓	91
9.3.3 稳定流动的特征	92
9.3.4 稳定流动的能量方程式	92
9.4 技术功	93
9.4.1 技术功的定义	93
9.4.2 可逆过程中的技术功	94
9.5 稳定流动能量方程式的应用	95
9.5.1 热交换器	96
9.5.2 动力机械	96
9.5.3 管道	96
9.5.4 绝热节流	96
习题	97
第10章 理想气体的性质与热力过程	99
10.1 理想气体的性质	99
10.1.1 理想气体的概念	99
10.1.2 理想气体的状态方程	99
10.1.3 理想气体的比热容	100
10.1.4 理想气体的热力学能、焓和熵	104
10.2 混合理想气体	106
10.2.1 混合理想气体的基本定律	106
10.2.2 混合气体的成分	106
10.2.3 混合理想气体的比热容、热力学能和焓	107
10.3 理想气体的热力过程	109
10.3.1 研究热力过程的目的及一般方法	109
10.3.2 理想气体的基本热力过程	109

10.3.3 多变过程	116
10.4 气体的压缩过程	121
10.4.1 单级活塞式压气机的工作原理	121
10.4.2 多级压缩和级间冷却	122
10.4.3 单级活塞式压气机的实际过程	123
10.5 气体在喷管中的流动过程	127
10.5.1 稳定流动中的基本方程式	127
10.5.2 喷管截面的变化规律	128
10.5.3 喷管的计算	129
习题	133
第 11 章 热力学第二定律	136
11.1 自发过程的方向性与热力学第二定律的表述	136
11.1.1 自发过程的方向性	136
11.1.2 热力学第二定律的表述	136
11.2 卡诺循环与卡诺定理	137
11.2.1 卡诺循环	137
11.2.2 卡诺定理	138
11.3 热力学第二定律的数学表达式	140
11.3.1 克劳修斯不等式	140
11.3.2 熵的导出	142
11.3.3 不可逆过程的熵变	143
11.4 孤立系统熵增原理	145
11.4.1 孤立系统的熵增原理	145
11.4.2 做功能力的损失	147
习题	148
第 12 章 水蒸气的热力性质	150
12.1 水的定压加热汽化过程	150
12.2 水和水蒸气的状态参数	151
12.2.1 水蒸气表	151
12.2.2 水蒸气图	154
12.3 水蒸气的基本过程	155
习题	157
第 13 章 动力循环	159
13.1 蒸汽动力装置循环	159
13.1.1 兰金循环	159
13.1.2 兰金循环分析	159
13.1.3 蒸汽参数对循环的影响	161
13.1.4 提高蒸汽动力循环效率的其他措施	162

13.2 活塞式内燃机的实际循环	164
13.2.1 活塞式内燃机的理想循环	164
13.2.2 活塞式内燃机的理想循环的分析	165
13.2.3 活塞式内燃机各种理想循环的热力学比较	168
13.3 燃气轮机装置的循环	169
13.3.1 燃气轮机装置简介	169
13.3.2 燃气轮机装置定压加热理想循环——布雷顿循环	170
习题	172
第 14 章 制冷循环	174
14.1 空气压缩式制冷循环	174
14.2 蒸汽压缩式制冷循环	176
14.3 吸收式制冷循环	178
14.4 热泵	179
习题	179

第 3 篇 传 热 学

第 15 章 传热学概述	181
15.1 传热学研究内容	181
15.1.1 传热学研究对象和任务	181
15.1.2 传热学在科学技术和工程中的应用	181
15.2 热量传递的三种基本方式	182
15.2.1 热传导	183
15.2.2 热对流	184
15.2.3 热辐射	185
15.2.4 传热过程	186
15.2.5 传热热阻	188
15.3 传热学的研究方法	189
习题	190
第 16 章 稳态热传导	192
16.1 概述	192
16.1.1 热传导的物理机理	192
16.1.2 热传导的基本定律	192
16.1.3 导热系数	194
16.2 热传导微分方程	195
16.2.1 热传导微分方程推导	195
16.2.2 边界条件和初始条件	198
16.3 一维稳态热传导问题	200
16.3.1 平壁	200
16.3.2 圆筒壁	203

16.3.3 球壳	206
16.4 肋片热传导问题	207
16.4.1 肋片的传热	207
16.4.2 通过等截面直肋的热传导	207
16.4.3 肋效率	210
习题	211
第 17 章 非稳态热传导	212
17.1 非稳态热传导概述	212
17.1.1 两类非稳态热传导	212
17.1.2 非稳态热传导的数学描述	213
17.2 零维非稳态热传导——集中参数法	215
17.2.1 集中参数法	215
17.2.2 集中参数法的判别条件	217
17.2.3 毕奥数 Bi_F 与傅里叶数 $ Fo_F $ 的物理意义	218
17.3 典型一维非稳态热传导问题	218
17.3.1 无限大平板的分析解	219
17.3.2 分析解的讨论	220
17.3.3 诺谟图	221
17.3.4 分析解应用范围的推广及讨论	223
习题	224
第 18 章 对流传热	225
18.1 对流传热概述	225
18.1.1 局部和平均表面传热系数	225
18.1.2 传热微分方程式	225
18.1.3 对流传热的影响因素	226
18.1.4 对流传热现象的分类	227
18.1.5 对流传热的研究方法	227
18.2 对流传热微分方程组	229
18.2.1 连续性方程	229
18.2.2 动量微分方程	229
18.2.3 能量微分方程	230
18.2.4 对流传热问题完整的数学描述	231
18.3 边界层与边界层传热微分方程组	232
18.3.1 流动边界层	232
18.3.2 热边界层	232
18.3.3 普朗特数	233
18.3.4 边界层传热微分方程组	234
18.4 对流传热的实验研究	236
18.4.1 相似原理	236

18.4.2	特征数的获取方法	237
18.4.3	特征数方程(实验关联式)	238
18.4.4	特征长度、定性温度、特征速度	240
18.5	单相对流传热的实验关联式	241
18.5.1	管内强迫对流传热的实验关联式	241
18.5.2	流体外掠平板对流传热	248
18.5.3	横掠单管对流传热	250
18.5.4	流体横掠管束的实验关联式	253
18.6	相变对流传热	256
18.6.1	凝结和沸腾传热的特点	256
18.6.2	凝结传热	256
18.6.3	沸腾传热	257
18.6.4	强化传热	257
	习题	258
第 19 章	热辐射基础理论	260
19.1	概述	260
19.1.1	热辐射的基本概念	260
19.1.2	热辐射的基本特性	260
19.1.3	几种热辐射的理想物体	262
19.1.4	两个重要的辐射参数	263
19.2	黑体辐射基本定律	264
19.2.1	普朗克定律和维恩位移定律	264
19.2.2	斯特藩-玻耳兹曼定律	265
19.2.3	兰贝特定律	266
19.3	实际物体的辐射特性	268
19.3.1	辐射力	268
19.3.2	定向辐射强度	269
19.4	实际物体的吸收特性	270
19.4.1	吸收比	270
19.4.2	灰体	271
19.4.3	基尔霍夫定律	272
	习题	274
第 20 章	辐射传热计算	276
20.1	角系数	276
20.1.1	角系数的定义	276
20.1.2	角系数的性质	276
20.1.3	角系数的计算方法	277
20.2	两表面封闭系统的辐射传热	281
20.2.1	两黑体表面间的辐射传热	281

20.2.2 有效辐射	281
20.2.3 表面辐射热阻与空间辐射热阻	282
20.2.4 两个灰体表面组成的封闭系统的辐射传热	283
20.3 多个灰体表面组成的封闭系统的辐射传热	285
习题	287
第 21 章 换热器的传热计算	289
21.1 换热器简介	289
21.1.1 换热器的定义	289
21.1.2 换热器的分类	289
21.2 换热器传热过程分析及计算	291
21.2.1 传热系数的确定	291
21.2.2 换热器中传热平均温差的计算	295
21.3 换热器强化传热技术	296
21.3.1 强化传热的目的及意义	296
21.3.2 强化传热的任务	296
21.3.3 换热器中强化传热的途径	297
习题	297
附录	299
参考文献	321



相关阅读请扫二维码

第 1 篇 流体力学

第 1 章 流体力学概述

1.1 流体力学的范畴

1.1.1 定义和特征

通常来说，能够流动的物质为流体。按照力学的定义，在任何微小切力作用下都能够发生连续变形的物质为流体，液体和气体统称为流体。

流体和固体的不同之处在于它具有流动的特征。在给定的切力作用下，固体只产生一定的变形，而流体将产生连续变形；当切力停止作用时，在弹性极限内固体可以恢复原来的形状，而流体只是停止变形。在静止状态下，固体能够同时承受法向应力和切向应力，而流体仅能够承受法向应力，只有在运动状态下才能够同时承受法向应力和切向应力。固体内的切向应力由剪切变形量(位移)决定，而流体内的切向应力与变形量无关，由变形速度(切变率)决定。而且，固体有一定的形状，流体的形状则取决于容器的形状。

虽然液体和气体都具有流动的特征，但是液体的流动性不如气体，一定质量的液体有一定的体积，气体则能充满所能到达的全部空间。据统计，气体所占的体积约为同质量液体的 1000 倍，因此气体的分子分布比液体稀疏得多，分子间距大，分子间的引力小，分子可以自由运动，因此气体的流动性大，而且容易压缩。相比较之下，液体的分子间距小，分子间的引力大，分子间互相制约，液体可以做一定的不规则运动，但不如气体的流动性好。

1.1.2 连续介质模型

由于构成流体的分子之间存在间隙，因此从微观上看，流体是不连续的，但流体力学只研究流体的宏观机械运动。研究流体的机械运动时，选取的最小流体微元是流体质点，它是体积无穷小而又包含大量分子的流体微团。从宏观上看，该微团尺度足够小，因此可以作为一个点来处理；但从微观上看，该微团又足够大，这样数据的统计平均才有意义。因此，只描述流体运动的宏观物理属性可以不考虑分子间隙，而是将流体看成无数连续微团组成的连续介质，流体的任一物理参数都可表示为空间坐标和时间的连续函数，而且是连续可微函数，这就是 1755 年欧拉提出的流体连续介质模型。其要点包括：①流体由连续排列的流体质点组成，质量分布连续，其密度 ρ 是空间坐标和时间的单值、连续可微函数；②流体处于运动状态时，质量连续分布区域内流体的运动连续，其速度 v 是空间坐标和时间的单值、连续可微函数；③质量连续分布区域内流体质点之间的相互作用力即流体内应力连续，其内应力 σ 为

空间坐标和时间的单值、连续可微函数。

连续介质模型适用于大多数场合，将流体物性参数和运动参数表示成连续函数的形式，从而为流体力学的研究带来极大方便。

1.1.3 研究内容

流体力学是研究流体平衡和宏观规律的科学。它研究流体平衡的条件及其压力分布规律，研究流体运动的基本规律，研究流体绕流某物体或流过某通道时的速度分布、压强分布、能量损失及流体与固体之间的相互作用等。

1.2 流体力学与生活、工程技术的关系

1.2.1 流体力学与生活的关系

我们生活在一个流体的世界里，生活中的许多现象都与流体力学有关，生活中的很多事物都巧妙地运用了流体力学的原理。

起源于 15 世纪的苏格兰的高尔夫球，其表面做成凸凹不平的粗糙面，就是利用粗糙度使层流转变为紊流以减小阻力的实际例子。以直径为 41.1mm 的高尔夫球为例，光滑表面的高尔夫球的临界雷诺数为 3.85×10^5 ，相当于临界速度为 135m/s 的情况，一般高尔夫球的速度达不到这么大。若将球的表面做成粗糙面，则促使层流提早转变为紊流，临界雷诺数降低到 1.0×10^5 ，相当于临界速度为 35m/s 的情况，一般高尔夫球的速度要大于这个速度。因此，流动属于雷诺数过大的紊流情况，阻力系数 C_d 较小，球反而打得更远。

飞机的顺风起飞问题也和流体力学有关。飞机起飞时，如果风迎面吹来，那么在相同速度条件下，其获得的升力就比无风或顺风时大，因而就能较快地离地起飞。迎风降落时，可以借风的阻力来减小飞机的速度，使飞机着陆后的滑行距离缩短一些。这是因为机翼的侧剖面是上表面拱起、下表面基本平直的形状，当气流吹过机翼上下表面而且同时从机翼前端到达后端时，从上表面经过的气流速度要比下表面的快。由伯努利方程可知，气流速度快的表面上的压强小，因此机翼上表面的压强较下表面的要小，这样就产生了升力，升力达到一定程度后飞机就可以离地起飞。

足球运动的香蕉球现象，是指运动员运用脚法，踢出球后使球在空中向前做弧线运行。用右脚内侧向侧前向踢球时，由于脚内侧的摩擦，足球会产生旋转，同时空气具有一定的黏性，因此当球旋转时，空气与球面发生摩擦，旋转着的球就带动周围的空气一起同向旋转，在足球旋转的带动下，足球周围也将产生和足球旋转方向一致的气流。由于足球向前运动，因此相对于足球的运动方向，空气气流是向后的。这样，在足球的左侧，旋转产生的气流和飞行中的相对气流的方向相同，使该侧空气流动速度变快；在足球的右侧，旋转产生的气流和飞行中的相对气流的方向相反，使该侧空气流动速度变慢。根据流体力学的伯努利定理，速度较大一侧的压强比速度较小一侧的压强要小，所以球两侧所受空气的压强不一样；由于球所受的合力左右不等，所以球在运行过程中就会转弯，称为马格努斯效应。

汽车的发展更是巧妙地应用了流体力学的原理。19 世纪末汽车诞生，当时的人们认为汽车阻力主要来自前部，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。实际上汽车阻力主要来自后部的尾流，称为形状阻力。自 20 世纪 30 年代起，人们开始运用流体

力学原理改进汽车尾部形状, 甲壳虫外形汽车的阻力系数降至 0.6; 20 世纪 50、60 年代, 船型汽车的阻力系数为 0.45; 到了 80 年代, 改进的鱼形汽车阻力系数降为 0.3; 之后进一步改进后的楔形汽车的阻力系数为 0.2。汽车的发展历程代表了流体力学不断完善的过程。

1.2.2 流体力学与工程技术的关系

流体力学也是工程技术的重要基础, 大量工程技术问题的解决及高新技术的发展都离不开流体力学。

在航空航天方面, 利用超高速气体动力学、物理化学流体力学和稀薄气体力学的研究成果, 人类已研制出超音速的战斗机和航天飞机; 还建立了太空站, 实现了人类登月的梦想, 创造了人类技术史上的奇迹。

在海洋工程方面, 单价过十亿美元、能抵抗大风浪的海上采油平台, 排水量达 50 万吨以上的超大型船舶, 航速达 30 节、深潜达数百米的核动力潜艇, 时速达 200km 的新型地效船等, 它们的设计制造都建立在水动力学、船舶流体力学基础之上。

在水利工程方面, 利用翼栅及高温、化学、多相流等理论成功设计出大型汽轮机、水轮机、涡喷发动机等动力机械, 为人类提供单机可达百万千瓦的强大动力。大型水利枢纽工程、超高层建筑、大跨度桥梁的设计和建造离不开水力学。

20 世纪, 流体力学在与工程学、天文学、物理学、材料学、生命学等学科的交叉融合中开拓了新领域, 建立了新理论, 创造了新方法。在 21 世纪, 这种交叉发展必将更加广泛和深入。21 世纪的人类面临的许多重大问题的解决都需要流体力学进一步发展, 这些问题涉及人类生存, 如气象预报、环境保护、生态平衡、灾害预报和控制; 还涉及人类生活质量的提高, 例如, 发展更快、更安全、更舒适的交通工具, 进行各种工业装置的优化设计, 从而降低能耗、减少污染等。

总之, 没有流体力学的发展, 现代工业和高新技术的发展会很艰难。流体力学在推动社会发展方面做出了重大贡献, 今后仍将在科学与技术的各个领域发挥更大的作用。

1.3 流体力学的发展历史

流体力学作为经典力学的一个重要分支, 它的发展与数学、力学的发展密不可分。它同样是人类在长期与自然灾害做斗争的过程中逐步认识和掌握自然规律从而逐渐发展形成的, 是人类集体智慧的结晶。人类最早对流体力学的认识是从治水、灌溉、航行等方面开始的。在我国, 水利事业的历史十分悠久。

我国古代已有大规模的治河工程。从 4000 多年前的禹治水, 到秦代的都江堰、郑国渠、灵渠三大水利工程, 既有利于洪水的疏排, 又有利于常年农田灌溉。西汉武帝时期, 黄土高原上修建的龙首渠创造性地采用了井渠法, 有效地防止了黄土的塌方。在古代, 以水为动力的简单机械就有了长足的发展, 例如, 用水轮提水, 或通过简单的机械传动去碾米、磨面等。古代的铜壶滴漏作为计时工具, 就是利用孔口出流使铜壶的水位发生变化来计算时间的。北宋时期, 运河上修建的真州船闸比 14 世纪末荷兰的同类船闸早 300 多年。明朝的水利学家潘季驯提出了“筑堤束水, 以水攻沙”和“蓄清刷黄”的治黄原则。清朝雍正年间, 何梦瑶提出了流量等于过水断面面积乘以断面平均流速的计算方法。

欧美诸国历史上有记载的最早从事流体力学现象研究的人物是古希腊学者阿基米德, 他

在发表的《论浮体》中,首次阐明了相对密度的概念,阐述了物体在流体中所受浮力的基本原理——阿基米德原理。著名物理学家和艺术家列奥纳多·达·芬奇用设计建造的小型水渠,系统地研究了物体的沉浮、孔口出流、物体的运动阻力,以及管道、明渠中的水流等问题。伽利略在流体静力学中应用了虚位移原理,并提出了运动物体的阻力随着流体介质密度的增大和速度的提高而增大的理论。托里拆利论证了孔口出流的基本规律。帕斯卡提出了密闭流体能传递压强的原理——帕斯卡原理。牛顿在 1687 年发表了《自然哲学的数学原理》,研究了物体在阻尼介质中的运动,建立了流体内摩擦定律,初步为黏性流体力学奠定了理论基础,并讨论了波浪运动等问题。伯努利在 1738 年出版的《流体动力学》一书中,建立了流体位势能、压强势能和动能之间的能量转换关系。在历史上,诸学者的工作奠定了流体静力学的基础,促进了流体动力学的发展。欧拉是经典流体力学的奠基人,1755 年发表《流体运动的一般原理》一书,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。欧拉还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。达朗贝尔 1752 年提出了达朗贝尔佯谬现象,即在理想流体中运动的物体既没有升力也没有阻力,从反面说明了理想流体假定的局限性。拉格朗日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。弗劳德对船舶阻力和摇摆的研究颇有贡献,他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。亥姆霍兹和基尔霍夫对旋涡运动和分离流动进行了大量的理论分析和实验研究,提出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理论。纳维首先提出了不可压缩黏性流体的运动微分方程组。斯托克斯严格地推导了这些方程,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,便统称该方程为 Navier-Stokes (纳维-斯托克斯) 方程。著名的学者谢才在 1769 年总结出了明渠均匀流公式——谢才公式,一直沿用至今。雷诺于 1883 年用实验证实了黏性流体的两种流动状态——层流和紊流的客观存在,找到了实验研究黏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。瑞利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。普朗特 (Prandtl, 1875—1953) 建立了边界层理论,解释了阻力产生的机制。之后,他又针对航空技术和其他工程技术中出现的紊流边界层,提出了混合长度理论。1918—1919 年间,普朗特论述了大展弦比的有限翼展机翼理论,对现代航空工业的发展做出了重要贡献。卡门在 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。在 1930 年发表的论文中,卡门提出了计算紊流粗糙管阻力系数的理论公式。此后,他在紊流边界层理论、超声速空气动力学、火箭及喷气技术等方面做出了不少贡献。布拉休斯在 1913 年发表的论文中,提出了计算紊流光滑管阻力系数的经验公式。白金汉在 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。尼古拉兹在 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,据此他还给紊流光滑管和紊流粗糙管的理论公式选定了应有的系数。科尔布鲁克在 1939 年发表的论文中,提出了把紊流光滑管区和紊流粗糙管区联系在一起的过渡区阻力系数计算公式。莫迪在 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逐渐成熟。

我国科学家的杰出代表钱学森早在 1939 年发表的论文中,便提出了平板可压缩层流边界层的解法——卡门-钱学森解法。他在空气动力学、航空工程、喷气推进、工程控制论等技术科学领域做出过许多开创性的贡献。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中的三元流普遍理论》和 1975 年发表的《使用非正交曲线坐标的叶轮机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三元流理论,至今仍是国内外许多优良叶轮机设计计算的主要依据。周培源多年从事紊流统计理论的研究,取得了不少成果,1975 年发表在《中国科学》上的《均匀各向同性湍流的涡旋结构的统计理论》便是其中之一。

20 世纪中叶以来,大工业的形成、高新技术工业的出现和发展,特别是电子计算机的出现、发展和广泛应用,大大推动了科学技术的发展。工业生产和尖端技术的发展需要,促使流体力学和其他学科相互渗透,形成了许多边缘学科,使这一古老的学科发展成包括多个学科分支的全新的学科体系,焕发出强盛的生机和活力。这一全新的学科体系,目前已包括(普通)流体力学、黏性流体力学、流变学、气体动力学、稀薄气体动力学、水动力学、渗流力学、非牛顿流体力学、多相流体力学、磁流体力学、化学流体力学、生物流体力学、地球流体力学、计算流体力学等。

1.4 流体力学的研究方法

目前,解决流体力学问题的方法有理论分析方法、实验研究方法和数值计算方法三种。

理论分析方法的一般过程:建立力学模型,用物理学基本定律推导流体力学数学方程,用数学方法求解方程,检验和解释求解结果。理论分析方法的结果能揭示流动的内在规律,具有普遍适用性,但分析范围有限。

实验研究方法的一般过程:在相似理论的指导下建立模拟实验系统,用流体测量技术测量流动参数,处理和分析实验数据。典型的流体力学实验有风洞实验、水洞实验、水池实验等。测量技术有热线、激光测速,粒子图像、迹线测速,高速摄影,全息照相,压力密度测量等。现代测量技术在计算机、光学和图像技术的配合下,在提高空间分辨率和实时测量方面已取得长足进步。实验研究方法的结果能反映工程中的实际流动规律、发现新现象、检验理论结果等,但结果的普适性较差。

数值计算方法的一般过程:对流体力学数学方程做简化和数值离散化,编制程序做数值计算,将计算结果与实验结果进行比较。常用的方法有有限差分法、有限元法、有限体积法、边界元法、谱分析法等。计算的内容包括飞机、汽车、河道、桥梁、涡轮机等流场计算,湍流、流动稳定性、非线性流动等数值模拟。大型工程计算软件已成为研究工程流动问题的有力工具。数值计算方法的优点是能计算理论分析方法无法求解的数学方程,比实验研究方法省时、费用低,但毕竟是一种近似解方法,适用范围受数学模型的正确性和计算机的性能限制。

三种方法各有优缺点,我们应取长补短,互为补充。流体力学的研究不仅需要深厚的理论基础,而且需要很强的动手能力,学习流体力学时应注意理论与实践结合,理论分析、实验研究和数值计算并重。