

流体力学基础

张 攀 李红艳 郑海成 编著

流体力学基础

张 攀 李红艳 郑海成 编 著



内 容 简 介

本书是流体力学的基础教材,介绍了流体力学的发展历史、流体力学与多个工程领域内容间的联系和基本研究方法,着重论述了流体力学中的基本原理和方法,主要内容包括:流体及其主要物理性质、流体静力学、流体运动学、流体动力学的积分方程和微分方程、相似理论与量纲分析、管道内的流动和可压缩流动基础等章节。

本书尽量略去了一些烦冗的数学推导和过于抽象的内容,尽可能多地通过图片展现它们;尽可能地从基本的物理定律和概念出发推导相关定理和基本方程;体现工科专业教材特点,注意理论与工程实际相联系,注意前导课程内容与本课程内容间的联系与区别,同时对一些容易混淆的概念做了深入辨析;行文通俗易懂,力求深入浅出。各章节后附有综合性或设计性习题。

本书可作为高等学校能源动力类、机械类、油气储运、化工和环境工程等专业本科生的流体力学教材,也可供相关专业的科学研究和工程技术人员参考。

版权专有 侵权必究

图书在版编目(CIP)数据

流体力学基础/张攀,李红艳,郑海成编著. —北京:北京理工大学出版社, 2017.8

ISBN 978-7-5682-4728-3

I. ①流… II. ①张… ②李… ③郑… III. ①流体力学-高等学校-教材 IV. ①O35

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第205707号

出版发行/北京理工大学出版社有限责任公司

社 址/北京市海淀区中关村南大街5号

邮 编/100081

电 话/(010) 68914775 (总编室)

(010) 82562903 (教材售后服务热线)

(010) 68948351 (其他图书服务热线)

网 址/<http://www.bitpress.com.cn>

经 销/全国各地新华书店

印 刷/三河市天利华印刷装订有限公司

开 本/787毫米×1092毫米 1/16

印 张/12

字 数/290千字

版 次/2017年8月第1版 2017年8月第1次印刷

定 价/55.00元

责任编辑/封雪

文案编辑/张鑫星

责任校对/周瑞红

责任印制/施胜娟

图书出现印装质量问题,请拨打售后服务热线,本社负责调换

前 言

随着科技水平的不断提高,流体力学的研究方向和应用范围在不断扩大。流体力学课程在高等学校各工科专业体系中越发受到重视。本书就是在这种需求和当前高等教育改革的要求下促成的。作者们在总结多年教学经验的同时,较为广泛地浏览了近些年来国内外的相关新版教材和专著,力求在章节编排和选材上反映学科进步、符合教学规律、适应教学改革的需求。

全书共8章,第1章介绍了流体力学的研究对象、研究任务、发展历史、研究方法,说明了流体力学基础理论与多个工程领域的联系。第2章重点讨论流体的力学性质,这是流体力学理论区别于固体力学的根本原因。第3章主要讨论流体静止的基本方程,及其在各种静止状态下的应用。第4章讨论描述流体运动的基本方法和重点讨论流线、迹线方程。第5章通过建立系统与控制体物理量间的关系,把牛顿力学中的动力学方程推广到流体中获得流体动力学方程,并介绍它们的工程应用。第6章重点介绍相似原理、量纲分析方法及其应用。第7章讨论工程中广泛存在的通道流动问题,说明流量和阻力损失的计算方法。第8章介绍气体动力学基础。全书为读者提供流体力学的基础知识,能够满足读者分析工程领域的基础流体力学问题的要求,同时也是读者进一步学习高等流体力学的基础。

本书尽量略去了一些烦冗的数学推导和过于抽象的内容,尽可能多地通过图片展现它们;尽可能地从基本的物理定律和概念出发推导相关定理和基本方程;体现工科专业教材特点,注意理论与工程实际相联系,注意前导课程内容与本课程内容间的联系与区别,同时对一些容易混淆的概念做了深入辨析;行文通俗易懂,力求深入浅出。

本书由张攀、李红艳、郑海成编著,其中第3、4章由李红艳、张攀合编,第5章由郑海成编写,其余由张攀编写并统稿。

书中部分例题和习题是参考、借鉴其他教材中的,在此向有关作者致谢。由于作者的水平有限,不妥与谬误之处在所难免,恳请广大读者、专家给予批评指正。

编著者

目 录

第1章 绪论	1
1.1 流体和流体力学	1
1.1.1 流体的概念	1
1.1.2 流体力学的范畴	1
1.2 流体力学与生活、工程的关系	2
1.2.1 生活中的流体力学	2
1.2.2 机械工程科学中的流体力学	3
1.2.3 动力工程及工程热物理科学中的流体力学	4
1.3 流体力学的发展历史	5
1.3.1 第一时期 (15 世纪以前)	5
1.3.2 第二时期 (15 世纪初期—19 世纪末期)	6
1.3.3 第三时期 (20 世纪初到 20 世纪中叶)	7
1.3.4 第四时期 (20 世纪中叶至今)	7
1.4 流体力学的研究方法	9
1.4.1 理论分析方法	9
1.4.2 实验方法	9
1.4.3 数值模拟方法	9
第2章 流体的力学性质	11
2.1 连续介质假说	11
2.1.1 流体质点 (微团)	11
2.1.2 连续介质假设	12
2.2 流体的基本物理性质	13
2.2.1 流体的密度	13
2.2.2 相对密度 (比重)	13
2.2.3 比容	13
2.2.4 混合气体密度与气体状态方程	14
2.2.5 重度	14
2.2.6 液体的蒸汽压	14
2.3 流体的力学特性	14

2.3.1	可压缩性和热膨胀性	14
2.3.2	黏性	17
2.3.3	流动性和流体的力学定义	19
2.3.4	表面张力特性	21
2.4	流体的分类	25
2.4.1	黏性流体与理想流体	25
2.4.2	牛顿流体与非牛顿流体	25
2.4.3	非牛顿流体及其黏度特性	26
2.5	作用在流体上的力	27
2.5.1	质量力	27
2.5.2	表面力	27
	习题	28
第3章	流体静力学	30
3.1	流体静压强及其特征	30
3.1.1	静止的特征	30
3.1.2	静压强的特征	30
3.2	流体静止的基本方程	31
3.2.1	流体静止的基本方程	31
3.2.2	等压面	33
3.3	重力场中流体静止	33
3.3.1	等压面形状	34
3.3.2	静水压强分布	34
3.3.3	不可压缩流体静压强分布的物理含义	35
3.4	压强测量	36
3.4.1	压强的表示及单位	36
3.4.2	压强测量的基本原理	37
3.4.3	液柱压强计	37
3.5	惯性力场中流体静止	40
3.5.1	匀加速直线运动	40
3.5.2	等角速度转动	42
3.6	静止流体作用在固体面上的力	44
3.6.1	作用在平面上的流体静压力	44
3.6.2	作用在曲面上的流体静压力	47
3.7	浮力及浮体的稳定性	51
3.7.1	浮力	51

3.7.2 浮体的稳定性	52
习题	53
第4章 流体运动学	56
4.1 描述流体运动的方法	56
4.1.1 拉格朗日法	56
4.1.2 欧拉法	57
4.1.3 拉格朗日法与欧拉法关系	57
4.2 流场的分类	57
4.2.1 定常和非定常场	57
4.2.2 均匀和非均匀场	58
4.2.3 流动的维数	58
4.2.4 随体导数 (时间导数、全导数)	59
4.3 迹线、流线和染色线	61
4.3.1 迹线	61
4.3.2 流线	61
4.3.3 染色线	63
4.4 流管、流束、流量、平均流速与当量直径	63
4.4.1 流管与流束	63
4.4.2 流量和净通量	64
4.4.3 平均流速	64
习题	65
第5章 流体动力学方程及其应用	66
5.1 系统与控制体的概念	66
5.1.1 系统与控制体	66
5.1.2 雷诺输运方程	67
5.2 连续性方程及其应用	69
5.2.1 积分形式连续性方程	69
5.3 动量方程及其应用	71
5.3.1 积分形式动量方程	71
5.3.2 控制体位置固定时动量方程的应用	72
5.3.3 控制体匀速运动时动量方程的应用	75
5.4 动量矩方程及其应用	76
5.5 能量方程及其应用	78
5.5.1 基于热力学第一定律的能量方程	78
5.5.2 伯努利方程	79

5.5.3	实际流体总流上的伯努利方程	80
5.5.4	伯努利方程的应用	81
5.6	微分形式连续性方程	84
5.7	微分形式动量方程	86
	习题	88
第6章	相似理论与量纲分析	94
6.1	相似的概念	94
6.1.1	几何相似	94
6.1.2	运动相似	95
6.1.3	动力相似	96
6.2	动力相似	96
6.2.1	动力相似准则	97
6.2.2	黏性力相似准则	97
6.2.3	压力相似准则	98
6.2.4	重力相似准则	98
6.2.5	弹性力相似准则	99
6.2.6	表面张力相似准则	99
6.3	相似条件	100
6.3.1	相似条件及应用	100
6.3.2	近似相似实验	101
6.4	量纲分析	102
6.4.1	量纲的概念	102
6.4.2	白金汉定理 (又称 π 定律)	103
	习题	106
第7章	管 (通) 道中的黏性流动	108
7.1	管道流动的基本特征	108
7.1.1	管道流动的状态	108
7.1.2	管道流动的能量损失	110
7.1.3	进口段流动	110
7.2	圆管中的层流	111
7.2.1	层流时的速度分布	111
7.2.2	阻力系数	113
7.3	圆管中的湍流	115
7.3.1	湍流描述方法	115
7.3.2	湍流应力	116

7.3.3 混合长度理论	117
7.3.4 湍流速度分布及阻力系数	119
7.4 非圆形截面通道沿程损失的计算	130
7.4.1 当量直径	130
7.4.2 阻力系数	131
7.5 管路中的局部损失	132
7.5.1 管道截面大小变化	132
7.5.2 管道方向变化	133
7.5.3 绕流阀门	134
7.5.4 关于能量损失的讨论	135
7.6 管路计算	136
7.6.1 管道计算的基本概念	136
7.6.2 管路系统	137
7.7 管道水击现象	141
7.7.1 水击产生的过程	141
7.7.2 水击压强	144
7.7.3 水击波的传播速度	144
7.7.4 防止水击危害的方法	145
习题	146
第8章 气体动力学基础	148
8.1 热力学参量	148
8.1.1 完全气体状态方程	148
8.1.2 比热容	149
8.1.3 内能	149
8.1.4 焓	150
8.1.5 熵	151
8.1.6 本章的假设	151
8.2 弱扰动波的传播及其特征	151
8.2.1 弱扰动波的传播和声速	151
8.2.2 弱扰动波在运动流场中的传播特征	153
8.3 完全气体动力学函数	155
8.3.1 气体的伯努利方程	155
8.3.2 滞止状态与滞止参量	156
8.3.3 临界参量与滞止参量间的关系	158
8.3.4 最大速度状态	159

8.3.5 状态参量间的关系	159
8.4 一维定常等熵流动	161
8.4.1 变截面管流分析	161
8.4.2 流管截面面积和流动马赫数的关系	164
8.4.3 无因次速度 λ	165
8.4.4 流量的计算	166
8.5 喷管的计算	167
8.5.1 收缩形喷管	168
8.5.2 拉瓦尔喷管	169
8.6 激波	171
8.6.1 激波的概念和类型	171
8.6.2 正激波的形成和传播速度	172
8.6.3 正激波前后气流参量的关系	175
习题	177
参考文献	179

第1章 绪 论

本章主要介绍流体的基本概念、流体力学的范畴；介绍流体力学理论在人们生活和生产过程中的应用；介绍流体力学理论的发展历史及其研究方法。

1.1 流体和流体力学

1.1.1 流体的概念

世界是物质的。物质形态万千，大至日月星辰等天体，小到原子、电子等微粒，它们都是不依赖于人们意识而存在的客观实体。物质处于永恒的运动和变化之中，物质的运动形式多样，它们既服从共同的普遍规律，又各具特征。各种物质总是以一定的聚集状态而存在着。通常认为物质有五种不同的物理聚集状态，即气态、液态、固态、等离子态和凝聚态。物质处于什么状态与外界条件密切相关。在人类生活和工程技术领域的压力和温度条件下，物质主要呈现气态、液态或固态。

从物质形态上看，**流体是气态和液态物质的总称**。大气和水是最常见的两种流体，大气包围着整个地球，而地球表面 70% 是水。流体运动状态与人类日常生活和生产密切相关，例如，大气运动，海水运动（包括波浪、潮汐、中尺度涡旋、环流等），管道及河道渠道中的流动，人体中血液的流动，运动物体（空中、水面上、水下及地面交通工具等）附近的流体运动，动力机械里的油（气）或油气两相流动，乃至地球深处熔浆的流动、星系的运动等。

1.1.2 流体力学的范畴

所谓流体力学，就是研究流体这类物质（气体和液体）的一门力学学科，其基本原理与理论力学、材料力学等研究固态物质的力学原理相同。如果说力学是研究物质的受力、能量与其平衡、变形或运动状态关系的学科。那么，可以说流体力学就是研究流体的受力、能量与流体的平衡、变形或运动关系的学科。力学可区分为静力学、运动学和动力学三部分，流体力学也可以粗略地划分为三大部分：流体静力学、流体运动学和流体动力学。流体静力学研究流体处于静止状态时的规律；流体运动学讨论在不考虑受力的条件下，流体运动的速度和一些流动显示的表达等；流动动力学分析流体运动状态（速度分布）与其受力间的关系，更多场合中，**流体动力学的最终研究目标是考察流体与固体间的相互作用**，如飞机受到

什么样的空气作用力等。

由于在很多力学性质上有别于固体物质,如图 1-1 所示的气、固、液三态物质是否有固定形状、是否有固定体积、静止时的应力状态等方面的差异,流体力学里的静力学、运动学和动力学要比理论力学、材料力学中的理论更为复杂。

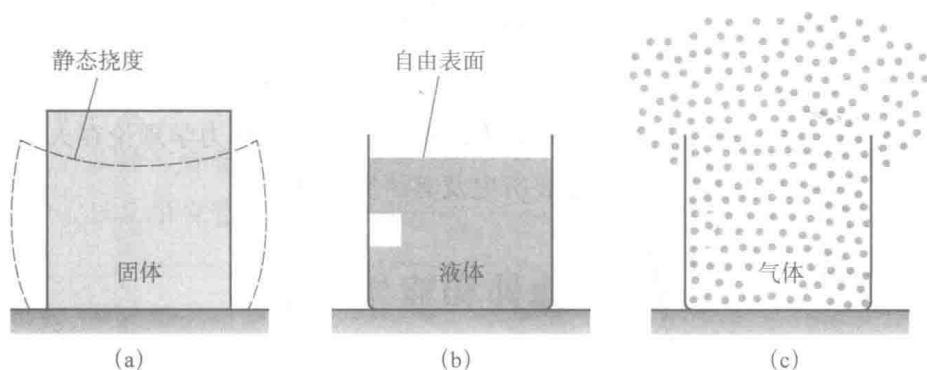


图 1-1 气固液三态物质的宏观差异

(a) 固体; (b) 液体; (c) 气体

当人为地把流体按不同特性划分时,还可以把流体动力学按不同的特性分为理想流体动力学、黏性流体动力学、不可压缩流体动力学、可压缩流体动力学和非牛顿流体力学等。不同动力学模型的侧重点不同,如理想流体动力学,即经典流体动力学,在很大程度上是一门数学分支学科,它处理的是没有黏性的理想流体。这样不考虑实际流体全部属性所得到的结果,其实用性是有限的。比如对管道流动来说,不考虑流体黏性的结果是流体在管道截面上的速度分布是均匀的,但实际并非如此。现代流体力学的一个非常重要的特点是考虑真实流体的各种特性,将流体力学基本原理与实验数据相结合,分析对实际工程有意义的流动问题。

1.2 流体力学与生活、工程的关系

1.2.1 生活中的流体力学

我们生活在一个流体的世界里,生活中的很多经验都是在经意或不经意中巧妙地掌握和运用了流体力学的原理获得的。如高尔夫球,其表面最开始是做成光滑的,后来人们发现表面破损的旧球反而打得更远。研究表明正常速度下的粗糙高尔夫球周围的气体流动更易趋于湍流流动,从而使高尔夫球的阻力系数降低,球打得更远。自汽车问世以来,其外形经历了较大的变化,最早的汽车外形是传统马车的箱形。随着人们对汽车阻力来源的不断认识,汽车的外形出现甲壳虫形、船形、鱼形、楔形等,其阻力系数从 0.8、0.6、0.45、0.3 到 0.2 不断降低。可以说汽车的发展历程就是人们对流体力学不断认识的过程。导流罩是影响和提升卡车动力特性的重要装置,研究表明,安装导流罩可使厢式货车表面的空气流动形态发生重要变化,流动形态的改变可大幅度的减小气动阻力,如图 1-2 所示。再如足球中的“香

蕉球”和乒乓球中的弧旋球都是由于球的旋转运动，造成球周围的空气压力不均衡，从而对球有指向一侧的空气压力造成的。

流体力学中的能量方程——伯努利方程可以解释很多物理现象。如飞机起飞，飞机机翼的横剖面是一个上缘向上拱起，下缘基本平直的形状。当气流吹过机翼上下表面且同时从机翼前端到达后端，从上缘经过的气流速度就要比下缘的快。简单地按照伯努利方程解释为：动能大的上表面气流的压力能就小。因此机翼上表面大气压强比下表面要小，即产生了升力，升力达到一定程度飞机就可以离地而起。

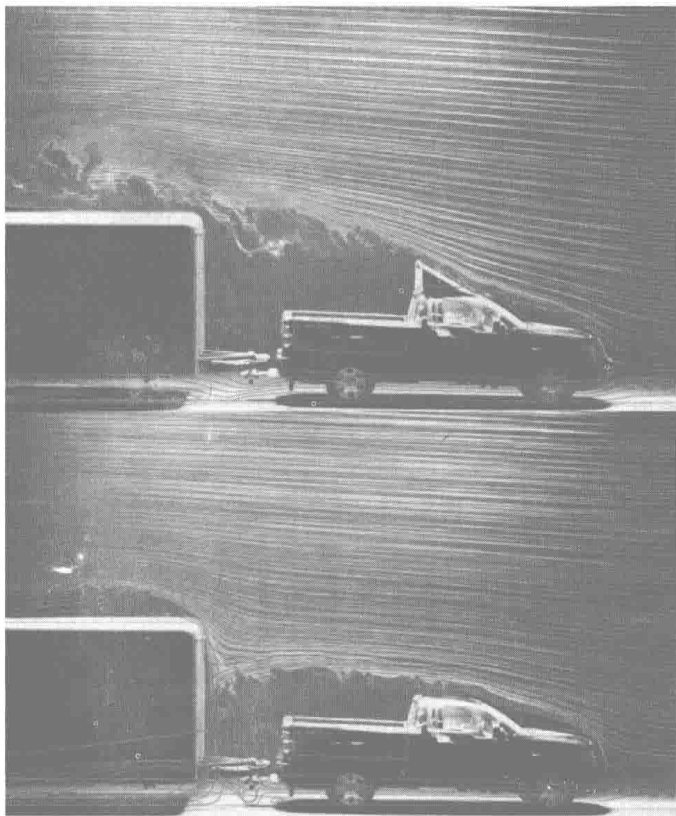


图 1-2 卡车导流罩流动形态 (Samimiy M 2004)

再如，两个并行的船舶很容易发生碰撞，浅水区航行的船舶很容易搁浅，是因为当两船并行时，两船间的水流较快，压力较小，两船外侧的水流相对较慢，压力较大，在内外压力差的作用下，两船就容易撞在一起。浅水区中船底与河床间距离小，水流速度大，而水压小，在压力差的作用下船容易搁浅。就如人在马路上，如果有汽车高速从旁驶过，会感到有一股力量将人推向汽车。这就是在火车站台上，人要在站台警戒线外侧，以防止被吸向火车而发生意外事故的原因。粗略地计算，当火车以 100 km/h 的速度运动时，施加在一个成年人身上的载荷可达到 500 N 以上。

1.2.2 机械工程科学中的流体力学

20 世纪以来，随着实验技术和流体力学理论的快速发展，流体力学成为众多工程和技术科学的重要基础，促成或促进了诸如航空航天技术科学、船舶与海洋工程科学、机械工程

科学、交通运输科学、化学工程、兵器工程、生命科学等的形成或发展。

在机械工程科学中存在诸多利用流体力学原理的地方。如轴承润滑就是应用流体动力学方法研究黏性润滑膜的应力分布、支撑力和摩擦阻力的理论，其目的是减小机器零件在运转时的摩擦阻力和提高润滑膜的承载能力。动力机械中，进、排气系统，喷油系统，冷却系统的优化设计都与流体力学原理有关。降低各种气流噪声源的流速，避免产生强湍流是减少气动噪声的主要措施。流体机械与工程学科研究各种以流体为工作介质和能量载体的机械设备的原理与设计，流体力学理论是该学科的理论基础。代表着高机械制造水平的喷气发动机（图1-3）制造包含诸多关键技术，而空气动力学是其中一项重要的内容，涉及发动机、燃烧室、涡轮内的气流问题，内外流耦合问题以及涡轮叶片与气流相互作用问题等。

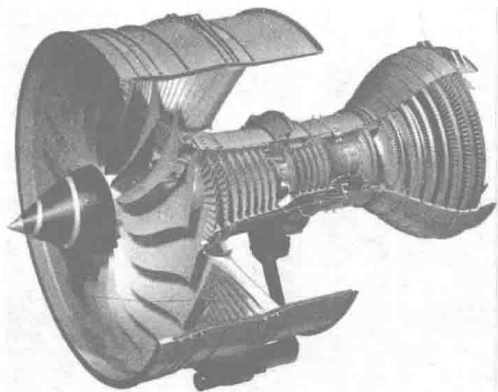


图1-3 喷气发动机

1.2.3 动力工程及工程热物理科学中的流体力学

动力工程及工程热物理科学以流体为工作介质，研究能源转换、传输和利用的理论和技能，提高能源利用率，减少一次能源消耗和污染物质排放等，因而流体力学理论是其重要基石。通常实现强化传热的过程，就是改变工质流动形态的过程。如在管道上设置传热型肋片（图1-4），利用翅间使流体在流动过程中产生旋流，旋流所产生的离心力使轴心部位的流体向翅间空间部位流动；翅间核心区的流体则向壁面方向流动，前者有助于提高翅片的换热能力，后者则加强翅根部位的换热。将普通圆管滚轧成横槽纹管时，流体流过横槽纹管会形成漩涡和强烈的扰动，从而强化了传热。将管道做成扩张—收缩交替的形式时，流体沿流动方向依次交替流过收缩段和扩张段。流体在扩张段中产生强烈的漩涡被流体带入收缩段时得到有效的利用，且收缩段内流速增高会使流体边界层变薄，这些都有利于增强传热。

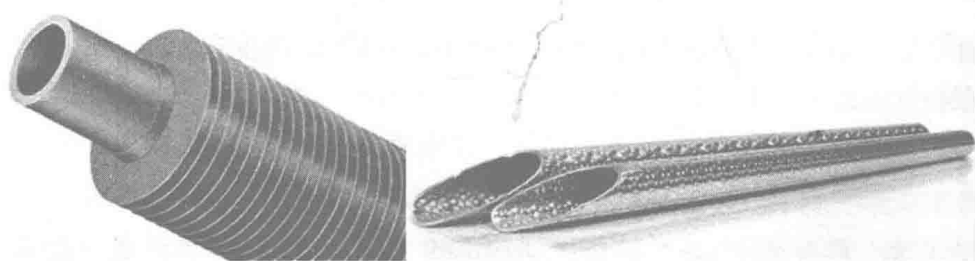


图1-4 换热管

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,其发展与数学、力学以及社会的发展进程密不可分。它是人类在长期与自然灾害做斗争的过程中逐步认识并掌握和利用其规律,逐渐发展形成的,是人类集体智慧的结晶。回顾整个流体力学的发展历史,大致可以把它分为四个时期。

1.3.1 第一时期 (15 世纪以前)

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。古时中国有大禹治水疏通江河的传说。战国时期的秦国,在公元前 256 年到统一中国后的公元前 214 年,先后修建了都江堰、郑国渠、灵渠三大水利工程。特别是李冰父子领导修建的都江堰,既有利于岷江洪水的疏排,又能常年用于灌溉农田,并总结出“深淘滩,低作堰”“遇弯截角,逢正抽心”的治水原则。

古代的漏壶,也叫漏刻,是古代利用滴水、漏沙来计量时间的一种计量工具。各种漏壶在原理和结构上都存在差异。水漏是以壶盛水,利用水均衡滴漏原理,观测壶中刻箭上显示的数据来计算时间,历史可追溯到夏、商时期。沙漏是为了避免水因气温变化而影响计时精度而设计的,其原理是通过流沙推动齿轮组,使指针在时刻盘上指示时刻,最早记载见于元代。

中国古代,利用水力或风力为动力的简单机械也有长足的进步。如水车又称孔明车,是我国最古老的农业灌溉工具;去除新产粮食中杂质的手摇风车直到二三十年前还在国内诸多农村地区使用(图 1-5),这些都是先人们在征服世界的过程中创造出来的高超劳动技艺,是珍贵的历史文化遗产。

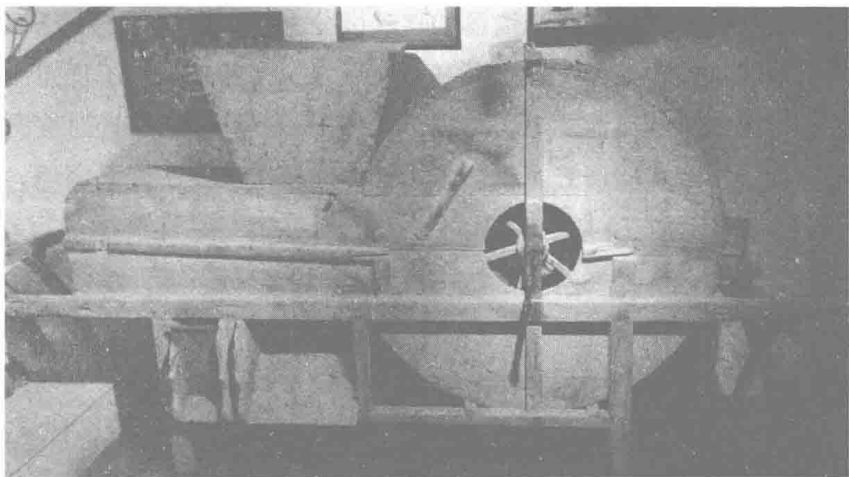


图 1-5 手摇风车实物图

欧洲历史上有记载的最早从事流体力学现象研究的是古希腊学者阿基米德 (Archimedes, 公元前 287—公元前 212), 在公元前 250 年发表的学术论文《论浮体》, 第一个阐明了相对密度的概念, 发现了物体在流体中所受浮力的基本原理——阿基米德原理。关于阿基米德原

理有这样一个传说：相传叙拉古赫农王让工匠替他做了一顶纯金的王冠，做好后，国王疑心工匠在金冠中掺了假，但这顶金冠确与当初交给金匠的纯金一样重。工匠到底有没有捣鬼呢？既想检验真假，又不能破坏王冠，最初，阿基米德也是冥思苦想而不得要领。一天，他在家洗澡，当他坐进澡盆里时，看到水往外溢，同时感到身体被轻轻托起。他突然悟到可以用测定固体在水中排水量的办法来确定金冠的比重。

总之，这一时期，流体力学发展的主要特点是人类在生活和生产实践中摸索和利用流体力学基本原理。

1.3.2 第二时期（15 世纪初期—19 世纪末期）

15 世纪以前，世界各地处于相对孤立的发展状态。15 世纪以后，文艺复兴与新航路的开辟，促进了欧洲资本主义的发展和繁荣，资产阶级革命为近代自然科学的诞生提供了社会条件。与此同时，科学本身为争得自己的独立地位，摆脱宗教的桎梏，也进行了不屈不挠的斗争。实验科学的兴起，更使自然科学有了独立的实践基础。从此，近代自然科学开始了它的相对独立发展的新时代。

著名物理学家和艺术家列奥纳多·达·芬奇通过实验观察描述了物体的沉浮、孔口出流、物体的运动阻力以及管道、明渠中水流等问题。1638 年，伽利略通过实验研究了运动物体的阻力。托里拆利论证了孔口出流的基本规律。1647 年，帕斯卡提出了密闭流体能传递压强的原理——帕斯卡原理和流体静力学的基本关系式。

牛顿在 1687 年出版的《自然哲学的数学原理》一书中研究了运动物体的阻力，建立了黏性流体的摩擦定律，为研究黏性流体力学奠定了理论基础。1738 年，伯努利提出了不可压缩流体位势能、压强势能和动能之间的能量转换关系——伯努利方程。1752 年，达朗伯得到运动物体受到的阻力为零的结论，即达朗伯佯谬。1755 年，欧拉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。欧拉是经典流体力学的奠基人而后，拉格朗日提出了理想流体无旋运动的复位势方法，进一步完善了经典流体动力学理论。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。

1827 年纳维、1845 年斯托克斯分别独立提出了不可压缩黏性流体的运动微分方程组，而后，该方程被称为纳维—斯托克斯（简称 N-S）方程。1852 年，弗劳德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。1883 年，雷诺用实验证实了黏性流体的两种流动状态——层流和湍流的客观存在，找到了实验研究黏性流体流动规律的相似准则数——雷诺数，以及判别层流和湍流的临界雷诺数。稍后，他又提出了雷诺应力，建立了不可压缩流体的湍流流动时的雷诺应力方程，为湍流理论研究奠定了基础。1892 年，瑞利在相似原理的基础上，提出了实验研究的量纲分析法（瑞利法）。

可以看到与其他很多科学理论一样，流体力学理论在这一时期初步形成与发展。

1.3.3 第三时期 (20 世纪初到 20 世纪中叶)

20 世纪的前半叶是空气动力学和实验流体力学快速发展的五十年。从 1903 年, 莱特兄弟首次完成完全受控制、附机载外部动力、机体比空气重、持续滞空不落地的飞行到第二次世界大战结束时喷火式战斗机、战略轰炸机出现, 飞机在性能上高速提升, 这缘于空气动力学理论和流体力学实验方法的飞速发展。

20 世纪初, 以儒科夫斯基、卡普雷金、普朗特等为代表的科学家, 开创了以无黏不可压缩流体位势流理论为基础的机翼理论, 建立了完善的二维升力理论。以普朗特为代表的哥廷根学派从推理、数学论证和实验测量等各个角度, 将纳维—斯托克斯方程简化, 建立了边界层理论, 从而为大雷诺数的绕流流动求解提供理论基础。冯·卡门发现了绕流物体后的卡门涡街, 提出了计算湍流粗糙管阻力系数的理论公式; 在湍流边界层理论、超声速空气动力学、火箭及喷气技术等方面也都有不少贡献。我国科学家的杰出代表钱学森在 1938 年发表的论文中, 提出了平板可压缩层流边界层的解法: 卡门—钱学森解法。机翼理论和边界层理论的建立和发展是流体力学的一次重大进展, 它使无黏流体理论同黏性流体的边界层理论很好地结合起来。

在工程流体领域, 1913 年, 布拉休斯提出了计算湍流光滑管阻力系数的经验公式。1915 年, 白金汉提出了著名的 π 定理, 进一步完善了量纲分析法。1933 年, 尼古拉兹公布了人工粗糙管内水流阻力系数的实测结果——尼古拉兹曲线。1939 年, 科尔布鲁克提出了适用于完全粗糙和过渡型圆管的阻力系数计算公式。1944 年, 莫迪绘制了工业管道的阻力系数图——莫迪图。

1.3.4 第四时期 (20 世纪中叶至今)

20 世纪中叶至今的几十年, 流体力学理论在三个方面有显著发展。

(1) 由于计算机科学的迅速发展, 使原来用分析方法难以进行研究的课题, 可以用数值计算方法进行, 出现了计算流体力学这一新的分支学科。

(2) 人们对湍流的认识进一步加深, 发现了湍流不是完全随机的, 而是存在着某种特殊的运动状态——即拟序结构, 也称相干结构。1967 年, 克兰 (Kline) 采用氢气泡显示实验发现: 壁面湍流边界层的黏性底层中氢气泡聚集在一系列的沿流向发展的拉伸区, 这些拉伸区被称为“条带”。图 1-6 (a) 所示沿展向 (垂直到流动方向) 交替出现速度较高和较低的条带, 即“高速条带”和“低速条带”。图 1-6 (c)、(d) 所示在远离壁面的对数律层和外层, 条带逐渐变得模糊、消失。条带交替出现并发展的上述过程表明湍流边界层运动并不是完全随机的, 而是有一定规律的, 但是条带形状并不完全相同, 条带间距也不是完全一致, 因而表现出拟序运动的特征。

(3) 从 20 世纪 60 年代起, 流体力学和其他学科的互相交叉渗透, 形成新的交叉学科或边缘学科, 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