

普通高等教育“十二五”规划教材

工程流体力学

上册

丁祖荣○编著



013058572

TB126

55

V1

普通高等教育“十二五”规划教材

工程流体力学

(问题导向型)

上册

丁祖荣 编著



北航

C1668633



机械工业出版社

TB 126
55
V1

01302825

本书是按钱学森先生倡导的工程科学思想和应用力学方法编著工程流体力学教材的一次尝试。应用力学方法本质上是问题导向型研究方法，因此本书冠以“问题导向型”副标题。

本书内容和教学要求符合教育部高等学校力学教学指导委员会和力学基础课程指导分委员会最新制定的《流体力学课程教学基本要求》。

全书分为上、下两册。上册的绪论篇介绍工程科学思想和应用力学方法；基础篇包括流体基本概念、流体静力学、流体运动学、流体动力学、量纲分析与相似理论；问题导向篇包括圆管流动与混合长度理论、缝隙流动与流体动力学润滑理论、气体喷管流动与一维等熵流模型。下册的问题导向篇（续）包括平板绕流摩擦阻力与边界层理论一、钝体绕流形状阻力与边界层理论二、明渠流动及其二维模型、地下水流动与渗流模型；专题篇包括流体中的质量传输、泵与风机。

本书的使用对象是工程类专业的本科生，如机械、环境、土木、农业工程、工程力学等专业的学生。机械类学生可只使用上册，其他专业学生需要用上、下两册。本书也可供相关专业的教师和工程技术人员参考。

图书在版编目（CIP）数据

工程流体力学：问题导向型．上册/丁祖荣编著．—北京：机械工业出版社，2013.4

普通高等教育“十二五”规划教材

ISBN 978-7-111-42241-9

I. ①工… II. ①丁… 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（2013）第 080425 号

机械工业出版社（北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037）

策划编辑：姜 凤 责任编辑：姜 凤 李 乐 张金奎

版式设计：潘 蕊 责任校对：张 媛

责任印制：乔 宇

北京机工印刷厂印刷（三河市南杨庄国丰装订厂装订）

2013 年 7 月第 1 版第 1 次印刷

169mm × 239mm · 17.25 印张 · 353 千字

0 001—2 000 册

标准书号：ISBN 978-7-111-42241-9

定价：29.00 元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心：(010) 88361066 教材网：<http://www.cmpedu.com>

销售一部：(010) 68326294 机工官网：<http://www.cmpbook.com>

销售二部：(010) 88379649 机工官博：<http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线：(010) 88379203 封面无防伪标均为盗版

前 言

我国近代力学的奠基人、航天技术的开创者钱学森先生在回顾了 20 世纪初到 20 世纪中叶科学与技术的发展历程，特别是总结了航空、核能和雷达等新技术的研制经验后提出了工程科学思想。他指出，除了自然科学外已形成了工程科学（又称技术科学），在力学领域内除了经典理论力学外已形成了应用力学。到 1982 年他更着重指出，“力学发展到现在，主要是应用力学”。2011 年在纪念钱学森先生诞辰 100 周年的中国力学大会上，力学界达成共识：我国的力学今后应主要沿着工程科学的道路发展，重点是发展应用力学。但是这一共识在高校目前的力学基础课程中还未得到充分体现，编写本书是用工程科学思想和应用力学方法论指导流体力学教学改革的一次尝试。

一、指导思想

1. 树立科学观念，夯实理论基础

按工程科学的观点，“人类的技术革命已开始从过去的‘工匠革命’阶段进入到‘科学家革命’时代”，即“任何重大新技术的出现已不再来源于单纯经验性的发明，而来源于由工程需求推动的科学理论与实验相结合的基础性研究”（参见绪论 A1.2）。科研人员、技术研发人员和工程师们应认识新时代的特点，树立工程科学的观念，努力掌握较宽厚的基础理论知识。基于这种观念，本书设立了阐述钱学森工程科学思想的“绪论篇”和归纳流体力学基础知识“基础篇”。

2. 学习科学方法，加强能力培养

钱学森先生总结的应用力学方法本质上就是问题导向型研究方法。该方法是从工程中提炼关键性问题，建立物理和数学模型，模型的求解经过实验检验，最后将结果应用于工程实践（参见绪论 A1.3）。本书设立的“问题导向篇”从还原历史的角度介绍了跨多个专业的典型案例，剖析了每个案例是如何运用应用力学方法研究和解决问题的。通过对这些案例的学习，除掌握必要的专业知识外，更着重于领会应用力学方法的精髓，提高认识和解决问题的能力。

3. 提供共同语言，弘扬协作精神

大量事实证明，当今重大工程技术成果的取得离不开三类人员的密切配合和团队协作：一类是对关键问题进行建模、求解和分析的工程科学家；另一类是将新概念和新方法应用于设计和工艺改革之中的科学工程师；第三类是组织新产品制造的工艺工程师。三类人员为了相互沟通，需要具有共同的理念，运用共同的语言，熟悉相关术语和符号。本书为三类人员提供相互交流的共同语言。前两类人员需要较完整地学习本书的全部或大部分内容，后一类人员可学习其中部分内容或将其作为

必备的参考书。

二、内容编排

在以上思想的指导下,本书在以下几方面作了探索和改进:

1. 关于书名

早在建立应用力学学科之前就有工程力学的提法。例如,在1890年德国慕尼黑工业大学就开设工程力学课程,出版工程力学教材。在我国工程力学作为一个学科是20世纪50年代钱学森先生回国后创立的。按钱学森先生的说法,近代力学就是应用力学,又称为工程力学,它应包含一般力学、固体力学和流体力学三大分支。国内将为工程专业开设的流体力学课程称为“工程流体力学。”本书冠名为“工程流体力学”则体现以工程科学思想的宗旨;同时为了强调应用力学方法,而该方法本质上是问题导向型研究方法,因此将“问题导向型”列为副标题。

2. 结构编排

全书内容按枝状开放式结构编排,分为四个层次,分别对应于篇、章、节和知识点。

第一层次用字母A、B、C、D、E编号,分别为绪论篇、基础篇、问题导向篇、专题篇和附录。绪论篇阐述流体力学工程科学思想及其形成过程,介绍应用力学的研究方法。后三篇分别按教育部对工程流体力学课程基础部分和专题部分的基本要求,结合本书的特点编排。基础篇包含了为建立物理和数学模型及分析求解所必需具备的流体力学基础知识。问题导向篇以7个工程问题为导向,介绍如何运用应用力学方法研究和解决这些问题。专题篇包含流体传质、泵与风机两个专题。附录包括常用数据表、单位换算表、习题答案等。

后三个层次用英文字母加数字编号并排序。例如,B篇中B1相当于章,B1.1相当于节,B1.1.1相当于知识点。公式、插图和表格在节内排序,如(B1.3.1)、(B1.3.2)等表示属于B1.3。例题在知识点内排序,如例B2.3.1A、例B2.3.1B等表示属于B2.3.1内的例题。例题插图与例题同号并加字母E,如BE2.3.1A、例BE2.3.1B等。习题以节名标号排序并加字母P,如BP1.3.1、BP1.3.2等表示属于B1.3节内的练习题,以便于学生自主选择。补充新的例题和习题均不打乱其他知识点例题和其他节习题的排序。

3. 核心内容

问题导向篇是本书的核心内容。按机械、环境、土木、农业工程等工程类专业的基本要求共设7章,相当于7个案例。每个案例以某个专业领域中的一个或多个关键工程问题为导向,例如

C1 管道流:如何计算圆管湍流阻力?

C2 缝隙流:滑动轴承的油膜如何产生向上托力?

C3 可压缩流:如何获得超声速气流?

C4 平板绕流:平板绕流摩擦阻力如何形成和计算?

C5 钝体绕流:如何解答达朗贝尔之谜?

C6 明渠流：明渠流与圆管流有何差别？

C7 渗流：如何分析多孔介质中的流动？

每章按应用力学的研究步骤，即提出问题、实验与观察、建模、求解与分析、实验验证、应用的次序对内容进行了重新编排和梳理。在介绍每个问题时尽量追溯其源头，还原其历史本来面貌，让读者了解研究和解决这个问题的全过程。其中有些内容是首次写入教科书内，例如：在 C1 中介绍了英国的科尔布鲁克关于管道湍流粗糙过渡区的阻力实验，由此导出了管道湍流的普适阻力公式；在“管路的工程计算”中归纳了工程上常用的阻力计算方法。

在 C3 中介绍了瑞士的斯托多拉对发展拉伐尔喷管和超声速研究所作的贡献。

在 C6 中不仅介绍了巴赞在法国第戎市附近的明渠模型中所做的经典性实验；还介绍了美国的柯尔根用普朗特的方法推导二维明渠普适速度分布和阻力公式，也介绍了明渠穆迪图及其在人工明渠中的应用等。

在 C7 中总结了达西在管道流、明渠流和渗流研究中的贡献等。

运用应用力学的观点对每个案例进行了小结。

4. 参考文献

本书的参考文献分两类：统管全书的参考文献列于附录后，依次用数字 [1]、[2] 等排序；在问题导向篇中每章后附有与本章内容有关的参考文献，依次用章号加数字排序，如 [C1-1]，[C1-2] 等。后者尽量选择原始文献，以便于读者查阅。

三、几点说明

(1) 国内许多流体力学教材将层流和湍流称为“流态”（在台湾称“流况”），将明渠流中的缓流、急流和临界流也称为“流态”。为了避免混淆，作者查阅了国外英文教材。几本权威性英文教材将层流和湍流归于 regimes，本书译为“流型”；将明渠流中的缓流、急流和临界流称为 states，本书译为“流态”。

(2) 对首次出现的重要外国人名均列出英文名称和相关年份，并对中文译名进行重新校核。中文译名采用《英语姓名译名手册》（第4版，商务印书馆，2009）中的名称。如：Keulegan 译为柯尔根（有的书译为科尔干或考尔根），Hazen & Williams 译为海曾-威廉斯（有的书译为海澄-威廉）等。

(3) 如何称呼所有量纲指数都等于零的量，至今仍是一个有争议的问题。国标 GB3101—1993 指出“所有量纲指数都等于零的量往往称为无量纲量”，也称为“量纲为 1 的量”。本书采用“无量纲量”的提法。

(4) 本书物理参数的拉丁字母和希腊字母列于主要符号表中，主要依据是国标 GB3101—1993。原则上平均值用大写字母表示（如平均速度 V ，流量 Q 等），分布量用小写字母表示（如速度分量 u, v, w ，明渠单位宽度的流量 q 等）。为了便于阅读国外文献，一些参数的英文符号尽量选用国外文献通用的符号。

(5) 本书的使用对象是工程类专业的本科生，如机械、环境、土木、农业工

程、工程力学及相关专业的学生。全书分为上、下两册。机械类学生可只使用上册，环境、土木、农业工程和工程力学类学生需要用上、下册。本书也可供其他专业的教师、学生和工程技术人员参考。

何友声院士看了本书初稿，提出了一些重要的建议和修改意见。复旦大学的许世雄教授担任本书的主审，提出了许多有价值的意见和建议，对提高本书质量很有帮助。华北水利水电大学的李国庆教授审阅了“明渠流动及其二维模型”，提出了详细的修改意见。在此一并表示衷心的感谢。还要感谢博士生董杰绘制了部分图表。最后要感谢家人对作者的支持和鼓励。

因作者水平有限，书中难免存在不当和谬误之处，敬请专家与读者不吝指出，帮助作者及时修正。

丁祖荣

2013年4月于上海交通大学

主要符号表

1. 拉丁字母

A	面积
a	加速度；半径
B	任意物理量
B^*	无量纲量，临界值； \bar{B} 时均值
b	宽度，厚度
C	常数，系数，形心
C_f	摩擦系数； C_p 压强系数； C_D 阻力系数
CS	控制面
CV	控制体
c	声速；比热容；翼弦
c_v	比定容热容； c_p 比定压热容
D	直径；压强中心
d	直径
d_h	水力直径
E	弹性模量；能量
e	单位质量流体的内能（比内能）；压强中心纵向偏心距； e_r, e_θ, e_z 柱坐标系三个正交单位矢量
F	力
F_b	体积力，浮力； F_s 表面力； F_D 阻力； F_L 升力
f	单位质量流体的体积力；压强中心横向偏心距
f_g	单位质量流体的重力
G	比压降；切变模量；重心
g	重力加速度
H	高度，深度；总水头
h	高度，淹深；水头；单位质量流体的焓（比焓）
h_L	水头损失； h_f 沿程损失； h_m 局部损失； h_0 总比焓
I	面积二次矩（惯性矩）
i	虚数单位
i, j, k	直角坐标系三个正交单位矢量
J	水力坡度
K	体积模量；局部损失因子
k	热导率；比例系数

L	长度; 动量矩
L	长度量纲
l	长度, 混合长度
M	质量量纲
M	力矩
Ma	马赫数
m	质量
\dot{m}	质量流量
N	牛[顿]
N_{sys}	系统广延量
n	平面法向单位; 转速; 曼宁粗糙系数; 孔隙率
P	应力张量; 湿周
p	压强, 表面应力; 动量
p_{ab}	绝对压强; p_g 表压强; p_v 真空压强; p_{atm} 大气压强
p_∞	无穷远压强; p_b 背景压强; p_0 总压强
Q	体积流量; 热量
q	明渠单宽流量
R	半径; 水力半径; 气体常数
r	半径
r_g	回转半径; $r \ \theta \ z$ 柱坐标系三个坐标量
SG	相对密度
s	流线; 单位质量流体的熵(比熵)
T	时间量纲
T	周期; 温度; 转矩
T_s	轴矩; T_0 总温
t	时间
U	均流速度, 牵连速度
$u \ v \ w$	直角坐标系三个速度分量
u_m	轴线速度, 最大速度; u' , v' 速度脉动值; u_s 壁面摩擦速度
V	平均速度
V_r	相对速度; V_∞ 无穷远速度
v	速度
$v_p \ v_\varphi \ v_z$	柱坐标系三个速度分量
W	功; 重量瓦(功率单位瓦特的国际符号)
\dot{W}	功率; \dot{W}_s 轴功率

\dot{w} 单位质量流体单位时间所做功, 即比功率
 w_s 单位质量流体的轴功, 即比轴功

2. 希腊字母

α 角度, 马赫角; 动能修正因子

β 角度; 温度系数; 动量修正因子

Γ 速度环量

γ 角度; 比热比

$\dot{\gamma}$ 角变形率

δ 微分符号

δ 角度; 边界层厚度

δ^* 边界层位移厚度

ε 线应变率; 粗糙度; 收缩比

η 分布函数; 效率

Θ 温度量纲

θ 角度; 边界层动量厚度

λ 达西摩擦因子; 波长

μ (动力)粘度

ν 运动粘度

$\xi \eta \zeta$ 辅助坐标系三个坐标量

Π 相似准则数

ρ 密度

τ 切应力; 体积

τ_w 壁面切应力; τ_p 压力体

φ 速度势函数

ψ 流函数

Ω 涡量

ω 角速度, 角频率

3. 其他

∇ 哈密顿算子

∇^2 拉普拉斯算子

$\frac{D}{Dt}$ 随体导数欧拉算子

dim 量纲符号

目 录

前言

主要符号表

A 绪 论 篇

A1.1 对流体运动的认识	1	成就	6
A1.2 流体力学从经典到近代的发展	3	A1.3 应用力学的研究方法	7
A1.2.1 经典流体力学时期	3	A1.3.1 应用力学研究步骤	7
A1.2.2 近代流体力学时期	4	A1.3.2 技术创新中的三类人员	9
A1.2.3 近代流体力学的技术		A1.4 单位制	10
		参考文献	11

B 基 础 篇

B1 流体基本概念	12	B1.6.2 表面应力与压强场	28
B1.1 连续介质模型	12	习题	30
B1.1.1 流体的宏观特性	12	B2 流体静力学	32
B1.1.2 流体质点与质元	13	B2.1 静止液体中的压强分布	32
B1.1.3 连续介质模型	13	B2.1.1 静止液体压强公式	32
B1.2 流体的易变形性	14	B2.1.2 压强的计示与计量	34
B1.2.1 流体易变形性的表现	14	B2.2 流体静力学基本方程	35
B1.2.2 流体易变形的原因	15	B2.3 静压强测量	36
B1.3 流体的粘性	16	B2.4 欧拉平衡方程	38
B1.3.1 流体粘性的表现	16	B2.5 液体对平壁的总压力	41
B1.3.2 牛顿粘性定律	17	B2.5.1 平壁总压力大小	42
B1.3.3 粘度	20	B2.5.2 平壁总压力作用点	43
B1.4 流体的可压缩性	21	B2.6 液体对曲壁的总压力	45
B1.5 常用的流体模型	23	B2.6.1 液体对二维曲壁的总压力	46
B1.5.1 无粘性与粘性流体模型	24	B2.6.2 浮力定律	48
B1.5.2 不可压缩与可压缩流体模型	25	习题	50
B1.6 流体中的力	26	B3 流体运动学	55
B1.6.1 体积力与重力场	27	B3.1 流动的数学描述	55

B3.1.1 欧拉法与拉格朗日法	55	B4.3 动量方程及其应用	93
B3.1.2 质点导数	57	B4.3.1 积分形式的动量方程	93
B3.1.3 控制体与雷诺输运公式	60	B4.3.2 定常流动量方程应用 举例	94
B3.1.4 曲面流量	62	B4.4 层流与湍流	98
B3.2 流动的分类	64	B4.5 纳维-斯托克斯方程	102
B3.2.1 定常与不定常流动	64	B4.5.1 流体运动微分方程	102
B3.2.2 三维、二维与一维流动	65	B4.5.2 N-S 方程	103
B3.3 流动的几何描述	67	B4.5.3 定解条件	105
B3.3.1 速度廓线与剖面	67	B4.5.4 N-S 方程的求解与建模	106
B3.3.2 迹线	67	B4.6 欧拉运动方程与平面势流	108
B3.3.3 流线	68	B4.6.1 欧拉运动方程	108
B3.3.4 脉线	70	B4.6.2 平面势流简介	109
B3.3.5 流管、流束与总流	71	B4.7 雷诺方程与雷诺应力	112
B3.4 流体元的变形与旋转	71	习题	114
B3.4.1 线应变率	71	B5 量纲分析法与相似理论	119
B3.4.2 角应变率	73	B5.1 量纲与无量纲化	119
B3.4.3 旋转角速度	74	B5.2 量纲分析法	122
习题	76	B5.2.1 白金汉定理	122
B4 流体动力学	79	B5.2.2 量纲分析法	122
B4.1 质量守恒方程	79	B5.3 流动相似与相似准则	127
B4.1.1 积分形式的连续性方程	79	B5.3.1 流动相似的概念	127
B4.1.2 微分形式的连续性方程	81	B5.3.2 确定相似准则数的方法	128
B4.2 伯努利方程及其应用	83	B5.3.3 常用的相似准则数	129
B4.2.1 伯努利方程	83	B5.4 模型实验与相似理论	131
B4.2.2 伯努利方程沿总流的表 达式	88	B5.4.1 模型实验	131
B4.2.3 伯努利方程的水头表达式	91	B5.4.2 相似理论简介	131
B4.2.4 伯努利方程的推广形式	92	习题	134
		C 问题导向篇	
C1 圆管流动与混合长度理论	136	C1.3.1 实验与观察：湍流时均 速度和脉动速度	142
C1.1 问题：如何计算圆管湍流阻力	136	C1.3.2 分析与建模：混合长度 理论	144
C1.2 圆管层流流动	137	C1.3.3 求解：速度分布对数律	145
C1.2.1 实验与观察：泊肃叶与 哈根实验	137	C1.4 圆管流动沿程损失	150
C1.2.2 建模与求解：速度分布 抛物线律	139	C1.4.1 沿程阻力通用公式—— 达西公式	150
C1.2.3 泊肃叶定律	141	C1.4.2 实验与观察：圆管阻力	
C1.3 圆管湍流流动	142		

实验	151	C2.5.2 偏心环形缝隙轴向流 动	209
C1.4.3 求解:阻力系数公式	155	C2.6 平行圆盘缝隙径向流动	210
C1.4.4 应用:穆迪图及管道水 力计算	160	C2.7 小结	212
C1.4.5 应用:非圆形管流动沿 程损失	164	参考文献	213
C1.5 圆管流动局部损失	166	习题	214
C1.6 管路的工程计算	171	C3 气体喷管流动与一维等熵流	
C1.6.1 管路工程计算简介	171	模型	217
C1.6.2 管路的工程计算式	173	C3.1 问题:如何获得超声速气流	217
C1.6.3 简单管路计算	175	C3.2 有关超声速气流的概念	218
C1.6.4 串联与并联管路计算	179	C3.2.1 声速	218
C1.6.5 枝状管路计算	182	C3.2.2 超声速流场中扰动波传 播规律	219
C1.6.6 网状管路计算	183	C3.2.3 激波与膨胀波简介	221
C1.7 小结	187	C3.3 实验与观察	223
参考文献	189	C3.3.1 拉伐尔喷管	223
习题	190	C3.3.2 斯托多拉实验和普朗特 实验	224
C2 缝隙流动与流体动力学润滑		C3.4 建模与分析:完全气体模型	225
理论	194	C3.5 建模与分析:一维等熵流动 模型	228
C2.1 问题:滑动轴承的油膜如何 产生向上托力	194	C3.5.1 绝能流能量方程	228
C2.2 实验与观察	195	C3.5.2 等熵流伯努利方程	229
C2.3 平行平面缝隙流动	196	C3.5.3 等熵流气动函数	230
C2.3.1 物理和数学建模	197	C3.6 应用:拉伐尔喷管流动原理	232
C2.3.2 求解与分析	198	C3.7 应用:喷管流动计算	235
C2.4 倾斜平面缝隙流动——流体 动力学润滑理论	202	C3.7.1 收缩喷管流动计算	235
C2.4.1 物理和数学建模	202	C3.7.2 拉伐尔喷管流动计算	237
C2.4.2 求解与分析	204	C3.8 小结	239
C2.5 环形缝隙轴向流动	208	参考文献	241
C2.5.1 同心环形缝隙轴向流动	208	习题	241
		E 附 录	
E1	243	E1.3.2 柱坐标系中的表达式	248
E1.1 常用流体的物理性质	243	E1.4 有关几何图形与公式	249
E1.2 单位换算表	245	E1.5 等熵流气动函数数据	250
E1.3 有关数学公式	247	E1.6 习题答案	255
E1.3.1 直角坐标系中的矢量运算	247	参考文献	261

A 绪 论 篇

A1.1 对流体运动的认识

人类虽然生活在空气和水的环境中,对流体运动的认识却非常贫乏。在作者主编的普通高等教育“十五”国家级规划教材《流体力学》上册的绪论篇中曾举了三个例子来说明人们对流动现象的困惑:要高尔夫球飞得远其表面应光滑还是粗糙?汽车阻力来自前部还是后部?机翼升力来自下部还是上部?为了进一步说明这个问题,下面再举三个来自日常生活又具有工程意义的例子。

1. 吹乒乓球:是推力还是吸力?

中学物理教师向学生演示漏斗吹乒乓球的实验。图 A1.1.1a 所示一倒置的漏斗,漏斗的小头带一段圆管。教师将一只乒乓球塞进漏斗底部后问:怎样使乒乓球吸在漏斗底部不掉下来?学生答:从圆管口吸气。教师再问:向里吹气如何?学生答:乒乓球被吹掉。教师先用手托住乒乓球后向里连续吹气,同时把手撤掉,结果乒乓球没有被吹走,反而被吸在漏斗底部;而且吹得越猛,吸得越牢。按常识分析,要使乒乓球吸在漏斗底部必须满足吸力条件:球的前部(圆管一侧)为低压,球的后部(漏斗大口一侧)为高压。吸气时显然满足这个条件。吹气时明明在球的前部产生了推力,为什么也能满足吸力条件?球前部的低压是如何产生的?这里不仅涉及流体的易变形性(参见 B1.2),还涉及流体在流过狭缝时会产生吸力的原理(参见 B4.2)。流动产生吸力的原理在工程上有许多应用,虹吸管的水流自动将低处的水吸到高处就是一例,飞机机翼在航行中产生升力也是根据相同原理。

撤掉漏斗,用一根皮管喷出的气流向上对着圆球,可让圆球稳定地悬浮在空中,圆球自身不断旋转,如图 A1.1.1b 所示。随着气流流速的增减,圆球的悬浮

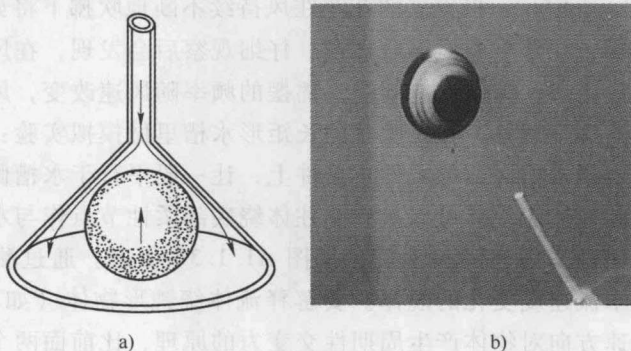


图 A1.1.1

高度随之增减，直至气流倾斜角增大到一定角度后圆球才落下。该实验的流体力学原理与漏斗吹乒乓球的原理有所不同（参见 C4.4）。

2. 水管出流：水柱凝聚还是发散？

图 A1.1.2a、b 所示为从同一水平水管口中流出的不同流量的水柱照片，要求比较两幅照片的差别并找出原因。两幅照片的第一个差别是：图 A1.1.2a 中的水柱喷射较近，图 A1.1.2b 中的水柱喷射较远。几乎所有人都能按常识判断：图 A1.1.2b 中的流量比图 A1.1.2a 中的大，因此水柱喷射得较远。两幅照片的第二个差别是：图 A1.1.2a 中的水柱呈发散状，图 A1.1.2b 中的水柱呈凝聚状。估计大多数人不能立即回答其中的原因。其实引起水柱形状不同的根本原因是管内的流动形态不同。虽然凭肉眼看不见管内的流型，但根据流体力学知识能判别管内的流型并描绘出截面上不同的速度剖面（参见 B4.4）。在管道流动的工程设计和计算中判别管内的流型非常重要，它直接影响到流体在管道里运输的阻力和能量损失（参见 C1.4）。

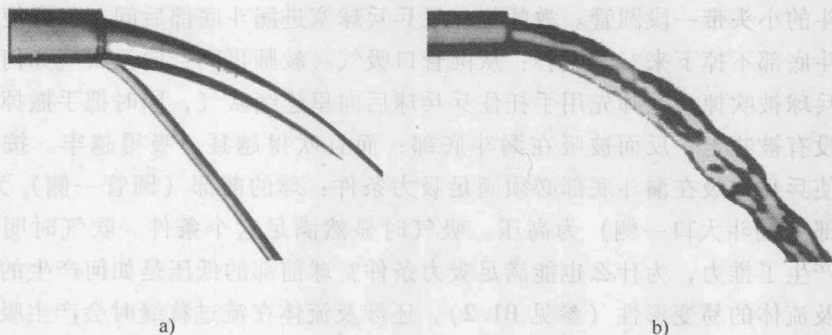
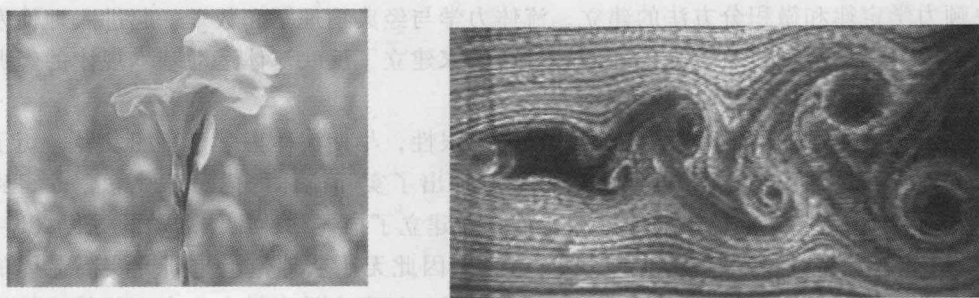


图 A1.1.2

3. 花茎迎风：前后摆还是左右摆？

如图 A1.1.3a 所示，一根直立的花茎在风持续不断地吹拂下将如何动作？人们会不假思索地回答：花茎将迎风前后摇摆。仔细观察后会发现，在风速不变的条件下花茎并不作前后摇摆，却作左右摇摆；摇摆的频率随风速改变，风速越大频率越高。为了定量观察这个现象，在实验室的长矩形水槽里做模拟实验：将一节短圆柱体垂直安装在固定于水槽底面的柔性连接件上，让一股平行于水槽侧壁的、没有任何波动的水流绕圆柱体流动。可以看到圆柱体绕底部柔性节点作与水流方向垂直的往复摆动，下游出现交替间隔的涡旋，如图 A1.1.3b 所示。通过测量可归纳出圆柱体摆动频率随水流速度变化的规律。要解释流体绕钝形物体（如花茎、圆柱体）流动时在垂直流速方向对物体产生周期性交变力的原理，比前面两个例子的原理更复杂一些（参见 C4.4.3）。



a) b)

图 A1.1.3

在工程上类似的现象有很多。例如，超高层建筑在大风中也会产生横向摇摆，如纽约的帝国大厦在大风盛行的季节里，左右摇摆的振幅可达1m左右。为减小超高层建筑横向摇摆对建筑物安全造成的影响，设计师采纳了流体力学家的建议，已采取多种措施来有效降低摇摆幅度。基于相同的原理，美国华盛顿州的中心跨距为853m的塔科马峡谷悬索桥在1940年的一场8级大风中，桥的跨向钢梁产生上下方向的大幅度振荡直至断裂，导致大桥垮塌。据统计，在揭开其中的流体力学原理并采取防止措施之前已经有10多座悬索桥按同样的方式被毁坏。

人们之所以不能凭直觉认识流体运动规律，首要原因是人们普遍缺乏对流体运动现象的感性认识：①人们用肉眼难以观察到真实的流动图像。因为空气看不见摸不着，水是无色透明的且被容器或管道包围着。②即使能看到部分流动形态，由于变化太快，肉眼也无法辨认。实际上，即使能辨认流动形态或测量某些参数，也不能弄清其中的原因。例如在上面所举的三例中，用流体测压计能测量例1中放在漏斗底部的乒乓球前后的压力，用流量计能测量并比较例2中两种水柱相应的流量，用流动显示技术能看到例3中流体绕钝体流动时钝体周围的流动图像，但如果缺乏必要的流体力学知识仍然无法解释“为什么”。

识别流动图像只是认识的第一步，真正揭开流动现象背后隐藏的规律和原因需要进行系统的科学研究。长期与流体搏击的鸟类和鱼类天生训练出运用这些规律的本领，具有高度智慧的人类为了揭开流动的奥妙建立了流体力学学科。

A1.2 流体力学从经典到近代的发展

A1.2.1 经典流体力学时期

从远古时期起人类就与流体打交道。在公元前人们从实践中已获得了有关流体流动的经验性知识，例如中国人修建了都江堰水利工程，罗马人建立了城市供排水系统，阿基米德通过实验和推理发现了静力学的浮力定律。到18世纪中期，由于

牛顿力学定律和微积分方法的建立，流体力学与经典物理学和数学一起进入理性发展阶段。以伯努利、欧拉为代表的一批科学家建立了反映流体运动基本规律的经典方程，奠定了流体力学学科基础。

由于流体运动的复杂性和人类认知的局限性，早期流体力学学科的发展经历了一段曲折的过程。早在17世纪末期牛顿就提出了实际流体的内摩擦概念，并得到了实验验证。到18世纪中期纳维和斯托克斯建立了描述粘性流体运动的方程（N-S方程）。但是当时还没有能力求解N-S方程，因此无法从理论上研究实际流体的运动规律。以欧拉为代表的早期自然科学家只好把研究重点转向一个理想的流体模型——无粘性流体。在近150年的漫长历史时期，无粘性流体一直是理论流体力学的主角。用伯努利方程、欧拉方程、平面和空间势流等理论在分析和计算流体的速度和压强转换、流体元的变形和旋转、波浪运动、机翼升力等问题中取得了很大成功，但在计算物体在流体中的运动阻力时得出阻力为零的违背常识的结果（参见C5.1），对管道流动阻力和河道水力损失等常规工程问题也无能为力。此阶段的理论流体力学学科着眼于对假想模型的纯理论研究，脱离了工程实际，被工程师们称为“学院式理论”。

为了满足河道和管道工程设计的需要，以谢齐和达西为代表的工程师们用实验方法系统地研究了影响河道和管道流动阻力的各种因素，并结合部分物理原理分别归纳总结出有实用价值的经验性公式：谢齐-曼宁公式和达西公式，奠定了水力学和实验流体力学的基础。这些经验性公式虽然可以解决某些具体的工程问题，但由于缺乏普适性，因此还不能从根本上揭示流体运动的基本规律。

通常把17世纪下半叶（牛顿提出粘性流体内摩擦假说）到19世纪末的流体力学归为经典流体力学阶段。此时的流体力学学科虽已形成了初步的理论体系，但分成了理论流体力学和水力学两个并行发展的分支。有人戏称当时的情况是，“水力学工程师观察着不能解释的现象，数学家解释着观察不到的现象”。这种理论与实际互相脱节的状况严重限制了流体力学的发展，直至20世纪初才得以改观。

A1.2.2 近代流体力学时期

通常把20世纪初到20世纪60年代称为近代流体力学时期（现代时期以电子计算机的应用为标志），其影响一直延续到今天。在流体力学发展史上这是一个非常重要的阶段。

19世纪下半叶，欧洲的学院式研究风气弥漫整个学术界，工程技术发展缓慢，经济长期萧条。德意志帝国的企业家和工程师们对大学与技术界严重疏远的状况强烈不满，要求大学介入工业领域，在提高生产效率方面发挥主导作用。此时，大洋彼岸的美国已经开始尝试将科学与技术结合起来并显示出强大的生命力。其主要标志是将由法拉第开创的、由麦克斯韦建立的、由赫兹验证的电磁场理论通过实验室研究转化为技术，发明制造了发电机和电动机并广泛应用于各工业部门，取得