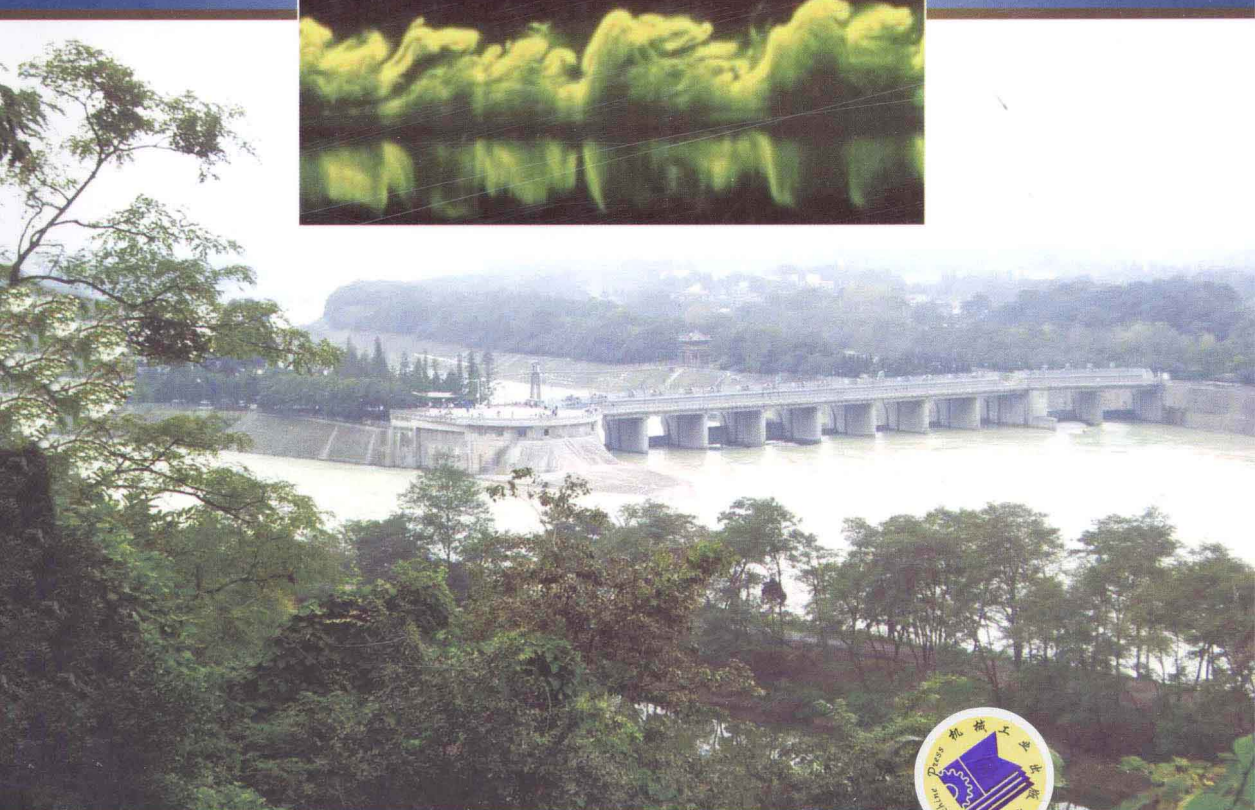
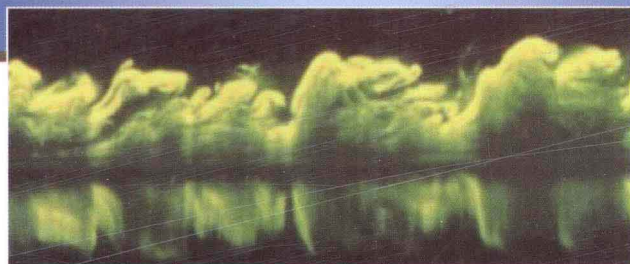


普通高等教育“十二五”规划教材

工程流体力学

下册

丁祖荣 ○ 编著

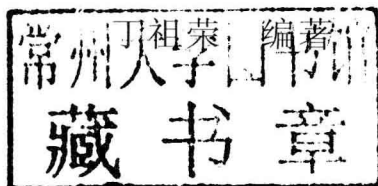


普通高等教育“十二五”规划教材

工程流体力学

(问题导向型)

下册



机械工业出版社

本书是按钱学森先生倡导的技术科学思想和应用力学方法来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。内容和教学要求参照教育部高等学校力学教学指导委员会和力学基础课程教学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。上册的绪论篇介绍技术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。本教程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.下册/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 978-7-111-42250-1

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082124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 陈崇昱 丁昕祯

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·13.25印张·323千字

0 001—2 000册

标准书号:ISBN 978-7-111-42250-1

定价:24.00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的“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的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在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。目前国内对工程力学的界定有些模糊,国内大学开设的“工程力学”课程仅包含理论力学和材料力学,不包含流体力学。为了区别于力学专业的流体力学课程,为其他工程专业开设的流体力学课程便冠名为“工程流体力学”。本书也沿用这个名称。

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,并结合本书的特点编排。基础篇内容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;如在B篇下,B1相当于章,B1.1相当于节,B1.1.1相当于知识点。公式和插图在节内排序,如(B1.1.1)、(B1.1.2)、(B1.1.3)等表示属于B1.1。例题在知识点内排序,如例B1.1.1、例B1.1.1A、例B1.1.1B等表示属于B1.1内的例题。习题按节名标号排序,如BP1.1.1和BP1.1.2等表示属于B1.1节内的练习题,以利于学生自主选择。补充新的例题和习题均不打乱其他知识点(或节中例题)或习题的排序。

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工程问题为导向,例如:

- C1. 管道流:如何计算圆管的流动阻力?
- 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——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，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 中介绍了巴赞在法国第戎的明渠模型中所做的经典性实验；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；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。

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，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”(也有的称“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，至今仍是个体有争议的问题。国家标准 GB3101—1993 中指出“所有量纲指数都等于零的量往往称为无量纲量”也称为“量纲为一的量”。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符号表中，主要依据是国家标准 GB3101—1993。原则上平均值用大写字母表示(如流量 Q 、平均速度 V 等)，分布量用小写字母表示(如明渠单位宽度的流量 q ，速度分量 u 、 v 、 w 等)。

(5) 本书的使用对象为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作为参考。

何友声院士看了教材初稿，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，他提出了许多有价值的建议，这些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看了“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为本书绘制了部分图表。最后要感谢家人对作者的支持和鼓励。

因作者水平有限，书中必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 3 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	传热系数；比例系数
L	长度量纲
L	长度；动量矩
l	长度，混合长度
M	质量量纲
M	力矩；偶极矩；浮体稳心
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
P	压强函数；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
R	半径；水力半径；气体常数
r	半径
r_ξ	回转半径
$r、\theta、z$	柱坐标系 3 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 3 个速度分量
u_m	轴线速度, 最大速度
$u'、v'$	速度脉动值
u_*	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
$v_\rho、v_\varphi、v_z$	柱坐标系 3 个速度分量
W	功; 重量
W	瓦[特]
\dot{W}	功率; \dot{W}_s 轴功率
\dot{w}	单位质量流体所做功率(比功率)
w_s	单位质量流体的轴功(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; 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)黏度
ν	运动黏度
ξ 、 η 、 ζ	辅助坐标系 3 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

C 问题导向篇 (续)

C4 平板绕流摩擦阻力与边界层

理论一 1

C4.1 问题: 平板绕流摩擦阻力如何形成和计算 1

C4.2 实验与观察 2

C4.3 建模与求解: 普朗特边界层方程 4

C4.3.1 物理与数学建模 4

C4.3.2 普朗特边界层方程求解 8

C4.4 建模与求解: 卡门动量积分方程 9

C4.4.1 物理与数学建模 9

C4.4.2 动量积分方程求解 11

C4.5 应用: 平板绕流摩擦阻力 14

参考文献 17

习题 18

C5 钝体绕流形状阻力与边界层

理论二 20

C5.1 问题: 如何解答达朗贝尔之谜 20

C5.2 实验与观察 21

C5.2.1 表面光滑圆柱体的绕流实验 21

C5.2.2 表面粗糙圆球的绕流实验 22

C5.3 建模与分析: 边界层分离的机理 24

C5.4 应用: 钝体绕流阻力 26

C5.4.1 摩擦阻力与形状阻力 26

C5.4.2 圆柱绕流阻力曲线 27

C5.4.3 卡门涡街 29

C5.5 应用: 不同形状物体的绕流阻力系数 31

C5.5.1 二维与三维钝体绕流阻力系数 31

C5.5.2 圆球与流线型体的绕流阻力 32

C5.6 边界层流动小结 34

参考文献 35

习题 36

C6 明渠流动及其二维模型 38

C6.1 明渠流基本知识 38

C6.2 问题: 明渠流与圆管流有何差别 41

C6.3 明渠流场分析 42

C6.3.1 实验与观察 42

C6.3.2 二维明渠均匀流建模与分析 44

C6.4 明渠均匀流沿程阻力分析 46

C6.4.1 明渠均匀流形成条件 46

C6.4.2 实验与观察 48

C6.4.3 建模与分析: 谢齐公式 51

C6.4.4 曼宁公式 54

C6.4.5 建模与分析: 柯尔根公

式	55	C6.7 小结	92
C6.5 应用：明渠均匀流阻力公式	57	参考文献	93
C6.5.1 分区阻力公式与阻力系数图	57	习题	94
C6.5.2 明渠阻力公式的应用实例	61	C7 地下水流动与渗流模型	97
C6.5.3 曼宁系数的确定	65	C7.1 问题：如何分析多孔介质中的流动	97
C6.5.4 水力最佳截面与允许流速	68	C7.1.1 多孔介质	97
C6.5.5 明渠均匀流水力计算	71	C7.1.2 地下水渗流问题	98
C6.6 明渠非均匀流	75	C7.2 实验与观察：达西定律	100
C6.6.1 判别流态的弗劳德准则	75	C7.3 建模与分析	103
C6.6.2 建模与分析：截面比能曲线	77	C7.3.1 渗流的连续介质模型	103
C6.6.3 临界底坡、缓坡与陡坡	81	C7.3.2 渗流运动方程 杜比公式	104
C6.6.4 建模与分析：明渠非均匀流能量微分方程	82	C7.3.3 渗流基本方程及求解	107
C6.6.5 应用：渐变流水面线分析	83	C7.4 应用一：地下河槽渐变渗流分析	109
C6.6.6 水跃与水跌	87	C7.5 应用二：井和井群渐变渗流计算	113
C6.6.7 堰流	89	C7.6 小结	117
		参考文献	119
		习题	119

D 专 题 篇

D1 流体中的质量传输	122	D1.3.2 随流湍流扩散方程	140
D1.1 分子扩散	123	D1.4 剪切流中的离散	142
D1.1.1 菲克第一定律	123	D1.4.1 一维离散方程	143
D1.1.2 扩散方程	124	D1.4.2 综合应用举例：明渠污染带分析	145
D1.1.3 瞬时点源的一维扩散	126	习题	148
D1.1.4 瞬时点源的三维和二维扩散	129	D2 泵与风机	151
D1.1.5 等强度连续点源和线源的扩散	130	D2.1 泵与风机的基本知识	151
D1.1.6 用镜像法求解有边界反射的浓度场	132	D2.1.1 泵与风机的分类	151
D1.2 随流扩散	134	D2.1.2 泵与风机的主要参数和基本构造	153
D1.2.1 随流扩散方程	134	D2.2 泵和风机的基本理论	154
D1.2.2 随流扩散方程求解	135	D2.2.1 积分形式的动量矩方程	154
D1.3 湍流扩散	138	D2.2.2 欧拉叶轮机方程	155
D1.3.1 湍流扩散概念	138	D2.3 泵与风机的特性曲线与性能参数	158

D2.3.1 理论特性曲线	158	D2.6.2 对泵运行工况的调节	169
D2.3.2 实际特性曲线	159	D2.7 泵的汽蚀与预防	170
D2.3.3 综合性能曲线	161	D2.8 泵和风机选型知识	173
D2.4 相似准则	162	D2.8.1 泵的选型	173
D2.5 比转速	163	D2.8.2 通风机的选型	174
D2.6 泵和风机的运行	166	习题	179
D2.6.1 泵在管路系统中的运行	167		

E 附 录 (续)

E1	182	E2	189
E1.1 流体的物理性质	182	E2.1 零攻角平板层流边界层精确 解	189
E1.2 单位换算表	184	E2.2 物体阻力系数	190
E1.3 有关数学公式	186	E2.3 习题答案	192
E1.3.1 直角坐标系中的矢量运 算	186	参考文献	195
E1.3.2 柱坐标系中的表达式	187		

C 问题导向篇(续)

C4 平板绕流摩擦阻力与边界层理论一

1903年12月17日美国的莱特兄弟(W. Wright & O. Wright)驾驶自行设计的“飞行者一号”在空中飞行59s,实现了载人动力飞机的首次飞行,从此人类进入了航空时代^[C4-1]。普朗特的边界层理论就是在这样的背景下创立的。边界层理论是揭示小黏度流体(空气或水)绕物体(如平板、机翼)作大雷诺数运动时产生阻力之机理的理论。边界层理论(及机翼升力线理论等)的创立使飞机的设计和性能取得了重大突破,使现代航空事业的进程足足提前了半个世纪。

边界层理论是应用力学形成的标志,是工程流体力学中最重要理论之一。边界层理论应用广泛。它不仅应用于边界上流动的动量输运过程,建立速度边界层;而且应用于能量和质量传输过程,建立温度边界层和浓度边界层。普朗特在创建小黏度流体(水和空气)以大雷诺数流过平板的边界层概念和方程的同时,还研究了对圆柱绕流的边界层分离效应。本书将围绕平板和钝体绕流阻力问题分别介绍这两部分内容,本章讨论前者,下一章讨论后者。

C4.1 问题:平板绕流摩擦阻力如何形成和计算

早在1687年牛顿就提出黏性流体的内摩擦概念,建立了牛顿黏性定律,但当时人们不知道如何将牛顿黏性定律加入到流体的运动方程中去。从18世纪30年代起,以伯努利和欧拉为代表的理论流体力学家干脆抛弃流体黏性,建立了统治经典流体力学领域达160多年之久的无黏性流体力学理论。直到1845年纳维和斯托克斯才建立了黏性流体运动方程(N-S方程),但又因数学求解的困难而阻碍了它的应用。因此,在很长的时期内无黏性流体力学一直在流体动力学理论中占主导地位。该理论能解释流体动能与压强势能的相互转换关系、机翼升力等问题,却解释不了平板在空气中运动时受到的阻力问题。

至19世纪末,用N-S方程仅能求解少量的黏性流动问题。例如,哈根巴赫等(1858)利用N-S方程求解出圆管层流的沿程水头损失与平均速度成一次方的解析表达式,求解结果得到泊肃叶实验的验证(见C4.2.3);库埃特(1890)求解出黏性流体在两块相距较近的平行平板间作层流运动时的壁面切应力^[C4-2](见C2.3.2)。

但对黏度很小的流体(如空气常温下 $\mu = 1.82 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$)对一块平板的平行绕流问题却无法求解。因此也无法回答：当黏度如此之小的空气自由地流过一块平板时，它能产生足够大的阻力吗？如此小的黏度是通过什么方式在形成物体绕流阻力中发挥作用的？这成为黏性流体力学理论具有挑战性的问题之一。

另一方面，对 19 世纪的飞机发明家而言，在飞机设计中如何估算并降低阻力也是长期困扰他们的难题之一。升力不够飞机飞不起来，阻力太大消耗动力太多飞机也飞不起来。在缺乏理论的指导下，他们借助实验来研究机翼的升力和阻力。被誉为弹道学之父的英国罗宾斯(B. Robins, 1707—1751)在 1746 年就发明了最早的机翼实验装置——旋臂机。1871 年英国航空学会的韦纳姆(F. H. Wenham, 1824—1908)设计并建造了最早的风洞^[C4-1]。在长达 150 多年的摸索中，众多发明家利用这些实验装置对机翼进行了大量研究和改进，但都没有取得对机翼产生升力和阻力的机理性认识，更没有上升到理论，因此在莱特兄弟之前没有一架载人动力飞机能飞上天。莱特兄弟也制造了风洞，主要用于改进翼形、提高升力。为了取得足够大的升力，莱特兄弟的“飞行者一号”采用双翼，翼展达 12.3m，翼面积 47.4m²，相当于 11 个乒乓球桌面的大平板。但是他们注意了升力，却忽略了阻力。由于他们不了解产生机翼阻力的本质，也就不知道如何减小阻力。“飞行者一号”具备了足够的升力使飞机飞上天，但是巨大的阻力几乎消耗了所有动力，使飞机只能实现短暂的升空，离现代意义上的飞行要求相差很远。

机翼绕流属于大雷诺数绕流问题。在工程与日常生活中，飞机、汽车、潜艇、鸟类、球类等常见运动物体的绕流雷诺数普遍大于 10^4 。例如，球类运动的雷诺数可达 10^4 以上，鸟类飞行的雷诺数达到 10^5 以上，汽车和船舶行驶的雷诺数可达到 10^6 以上，飞机绕流的雷诺数则更高。这说明大雷诺数流动在自然界和工程界是普遍存在的现象。

机翼与平板的大雷诺数绕流属于同一类绕流阻力问题。为了从理论上解决机翼绕流阻力问题，可以从研究平板绕流阻力的形成机理和计算方法入手。需要回答的问题是：小黏度流体(空气)对零攻角(来流速度与板平面的夹角为零)的有限长薄平板作大雷诺数绕流时摩擦阻力是如何形成的？这种摩擦阻力如何计算？

C4.2 实验与观察

1872 年英国造船工程师弗劳德(W. Froude)发表了在水池里所做的运动平板表面摩擦阻力实验结果^[C4-3]。他发现摩擦阻力并不与板的长度成正比，而是与其小于 1 的幂次成正比；并认为摩擦阻力与沿板面流动的流体所受的动量损失有关。但弗劳德的实验没有涉及边界层概念。真正从事与边界层有关的实验观察和理论建模工作的是普朗特。

1. 水槽平板绕流显示实验

由于水和空气是无色透明的,肉眼无法直接观察这类小黏度流体对平缓的壁面作无分离的大雷诺数绕流时的流动现象(这也是长期阻碍人们认识这类现象的原因),必须借助流动显示和测量技术。为了便于研究,通常让物体固定而让流体以一定速度流过物体(称为自由来流),根据运动相对性原理,这种方式与实际绕流的阻力是等价的。

图 C4.2.1 是普朗特在水槽里拍摄的水对一固定的零攻角尖缘薄平板的绕流流场的显示照片^[C4-3],水从左向右流动。图中的流线是在水面上撒白色示踪粒子后拍摄成像的,粒子踪迹的长度正比于流动速度。该照片虽然是在普朗特提出边界层理论以后拍摄的,但对认识边界层现象提供了很好的实验证据。从照片上可观察到如下现象:

(1) 平板附近的流动分成两层。贴近平板的粒子踪迹线很短,说明速度小;远处的粒子踪迹线很长,说明速度大。

(2) 低速流动只局限在平板附近的狭窄区域内,在该区域内流速沿垂直板面的方向增加得很快。

(3) 沿着平板顺流方向该区域的厚度逐渐增加。

(4) 随着水槽流速的增大,上述的分层现象继续保持,且平板附近低速层的厚度变得更薄。

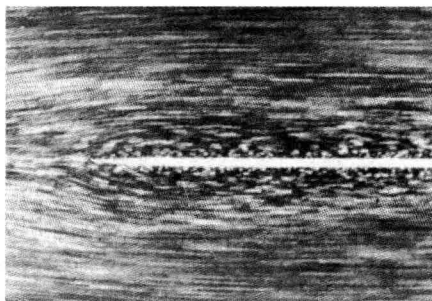


图 C4.2.1

2. 风洞流线型体绕流实验

为了观察和测量壁面附近流体的减速效应对绕流物体表面压强分布的影响,将一根细长的流线型回转体模型沿纵向固定在风洞实验段中心的测力天平支架上,流线型体的轴线与实验段轴线重合。流线型体的形状如图 C4.2.2 上方所示^[C4-5],绕流雷诺数为 $Re = Ul/\nu = 1.3 \times 10^6$ 。测量内容为:

(1) 流线型体的绕流阻力,并与与表面积相等的平板绕流阻力比较。

(2) 流线型体表面沿子午线的压强分布,并与平面势流理论结果比较。

压强分布测量的方法是:在模型表面沿子午线开一排测压小孔,小孔依次与多管测压计的测压管相连。多管测压计上的液面读数显示流线型体表面沿子午线的压强分布。测量结果如图 C4.2.2 下方的圆点所示。

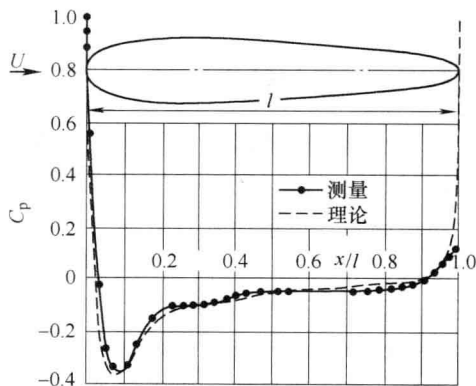


图 C4.2.2