



流体力学 通论

Fluid mechanics biography

刘沛清 著



科学出版社

流体力学通论

刘沛清 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书是一本主要以传记形式和科普特色编著的流体力学通论。作者结合自己多年教学体会和经验,尝试一种将自然科学与人文历史相结合、知识传承与认知规律相结合的编纂模式,将抽象深奥的流体力学知识点打碎,从直观易懂的物理概念入手,以由浅入深、由表及里的方式,将流体力学发展史和基本知识点有机结合起来,分八章将流体力学基础、空气动力学、液体动力学、计算流体力学、实验流体力学、风洞和水洞设备、飞行奥妙与空气动力学原理和流体力学人物志等基本知识和发展历史介绍给读者,以便为初学者激发兴趣点、全面了解流体力学的发展和进一步深入学习提供参考。

本书适合于热爱流体力学的所有人们,包括大专院校的教师、研究生、本科生,从事与流体力学有关各行业的技术人员和科学爱好者,部分内容也适合于广大中学生。

图书在版编目(CIP)数据

流体力学通论 /刘沛清著. —北京:科学出版社, 2017

ISBN 978-7-03-051540-7

I. ①流… II. ①刘… III. ①流体力学-物理学史 IV. ①O35-091

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第009660号

责任编辑:钱 俊 鲁永芳 / 责任校对:张凤琴

责任印制:肖 兴 / 封面设计:楠竹文化

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京利丰雅高长城印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017年3月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2017年3月第一次印刷 印张:41 1/4

字数:814 000

定价:298.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

刘沛清教授简介

刘沛清，男，1960年12月30日生，系山西省忻州市人，中共党员。1982年在华北水利水电学院获学士学位，1989年在河海大学获硕士学位，1995年在清华大学获博士学位。1997年至今，在北京航空航天大学流体力学研究所工作；2000年至今，任教育部流体力学实验室责任教授，博士生导师；2003年至2012年，任航空科学与工程学院副



院长。现为空气动力学国家级精品课负责人，国家级航空航天实验教学中心主任，国家航空科学技术实验室大型飞机高级人才培训班班主任，中国空气动力学学会第六届理事会理事，第十届流体力学专业委员会工业与环境流体力学专业组组长，《空气动力学学报》等编委。

2000年获全国100篇优秀博士论文称号。2003年获全国国防系统百名优秀博士、硕士先进工作者称号。2005年获国家教学成果二等奖。2009年获北京市优秀教师。2009年获北京市教学成果一等奖。2011年获北京市教学名师。2014年刘沛清负责的“先进飞行器高级人才联合培养基地”获全国示范性全日制工程硕士专业学位研究生联合培养实践基地称号。

承担教学任务：博士生课程“近代流体力学”；硕士生课程“湍流模型及

其应用”和“水动力学理论”；本科生全国精品课程“空气动力学”和北京航空航天大学通识课程“现代大学概论”。

长期从事空气动力学、水动力学实验和数值模拟工作。近年来结合国家自然科学基金重点、面上项目、国防预研和国防基础等课题，利用理论、实验和数值模拟等多种手段对工程中的一些复杂流动（旋涡分离与控制、高速层流控制技术等）开展了系统深入的研究，解决了一系列气动设计难题。近年来的主要研究方向有：现代飞机旋涡分离及其控制技术，高速层流控制技术，现代高效轻质螺旋桨设计与优化技术，大型飞机起降气动特性、地面效应和水上迫降。研究成果在国内外学术刊物上发表论文200余篇，被SCI、EI收录60多篇，出版著作8部，授权国家发明专利19项。

电子信箱：lpq@buaa.edu.cn

办公电话：010-82339568

通信地址：北京航空航天大学新主楼C1109（邮编：100191）

如果说现代文明起源于机械工业的兴起和发展的话,那么流体力学与机械工业的结合起到了决定性的作用,也可以说流体力学是机械工业现代化皇冠上的一颗耀眼的璀璨明珠。无论是古代的水力机械还是现代最复杂的航空发动机的诞生,均与流体力学的发展密不可分,也可以说流体力学几乎涉足诸如水轮机、汽轮机、燃气轮机、膨胀机、风力机、水泵、风扇、通风机、压缩机、液力耦合器、液力变矩器、风动工具、气动马达、液压马达以及各种流体输运和控制设备等,所有以流体为工质来转换能量的机械。因此,毫无疑问,流体力学是机械工业最为活跃的一门专业基础学科,也是工科类院校开设的一门专业基础课程。为了激发初学者的学习兴趣,便于了解流体力学基本知识和发展规律,主要以传记形式和科普特征,将流体力学的科学知识与人文历史结合起来,分流体力学基础理论、空气动力学、液体动力学、计算流体力学、实验流体力学、风洞和水洞设备、飞行奥妙与空气动力学原理和流体力学人物志共八章介绍给读者。其中,流体力学基础、空气动力学、液体动力学和计算流体力学部分,主要介绍理论的发展及其应用;实验流体力学部分,主要介绍相似性原理、流动显示和测量技术等;风洞和水洞设备部分,主要介绍风洞和水洞设备的发展与应用;飞行奥妙与空气动力学原理部分,主要介绍飞行认知、飞行原理和飞机部件功用等;流体力学人物志部分,介绍了阿基米德、达芬奇、伽利略、牛顿、莱布尼茨、伯努利、欧拉、拉格朗日、亥姆霍兹、斯托克斯、雷诺、马赫等著名科学家在流体力学发展中的作用和主要成就。

本书在内容的取材和论述过程中，从直观易懂的物理概念入手，将科学知识与发展历史相结合，用通俗易懂的语言介绍了流体力学的发展和概论。

本书承蒙北京大学工学院魏庆鼎教授和清华大学航天航空学院朱克勤教授的审阅，并提出重要建议，深表谢意。

在本书的编写过程中，作者还得到了北京航空航天大学应用空气动力学研究室的教师和同学们的大力支持。陆维爽博士生为本书的资料收集提供了帮助，借此表示衷心的感谢。

感谢科学出版社钱俊、鲁永芳编辑和其他同志们为本书的出版付出的辛勤劳动。

流体力学理论严谨，应用广泛，这对编著通论来说是一个不小的困难。所涉及内容除了理论、实验、数值计算三大分支外，尚有许多工业领域的应用，限于篇幅，本书无法全面介绍，这里主要选了空气动力学和液体动力学作为代表。因本人才疏学浅、精力有限，不妥之处在所难免，望广大读者批评指正。

刘沛清

于北京航空航天大学

2016年9月

前言

第 1 章 流体力学基础 / 001

- 1.1 流体力学早期发展与微积分结合 / 002
- 1.2 描述流体运动方法 / 006
- 1.3 理想流体运动微分方程建立与应用 / 014
- 1.4 黏性流体运动微分方程与涡量输运方程 / 025
- 1.5 边界层理论的建立与应用 / 030
- 1.6 层流转捩现象与稳定性理论 / 036
- 1.7 湍流现象及其特征 / 041
- 1.8 湍流的统计理论 / 047
- 1.9 工程湍流理论 / 054
- 1.10 湍流模式 / 059
- 1.11 湍流高级数值模拟技术 / 063
- 1.12 湍涡的多尺度讨论 / 066

第2章 空气动力学 / 077

- 2.1 空气动力学的发展概述 / 078
- 2.2 低速翼型绕流 / 083
- 2.3 翼型绕流物面近区边界层的发展与影响机理 / 097
- 2.4 机翼的低速绕流 / 106
- 2.5 可压缩空气动力学基础 / 115
- 2.6 可压缩流动的求解方法 / 131
- 2.7 高超声速空气动力学 / 134
- 2.8 气动声学原理 / 139
- 2.9 低速翼型及机翼失速特性 / 149
- 2.10 空气动力学在现代飞行器研制中的先导性作用 / 155

第3章 液体动力学 / 159

- 3.1 液体动力学发展 / 160
- 3.2 液体运动 / 166
- 3.3 一元流理论与机械能损失 / 170
- 3.4 有压管道恒定流 / 178
- 3.5 明渠恒定流 / 182
- 3.6 有压管道非恒定流 / 212
- 3.7 明渠非恒定渐变流 / 222
- 3.8 水波动力学基础 / 226
- 3.9 液体动力学应用 / 265

第4章 计算流体力学 / 275

- 4.1 计算流体力学起源 / 276
- 4.2 离散格式与迭代方法 / 280
- 4.3 计算流体力学应用 / 286

- 4.4 计算流体力学商用软件 / 294
- 4.5 大型轴流风机流场数值模拟 / 297
- 4.6 大型气动声学低速回流风洞流场数值模拟 / 304

第 5 章 实验流体力学 / 315

- 5.1 经典流体力学实验 / 316
- 5.2 相似性原理 / 321
- 5.3 相似理论的应用 / 327
- 5.4 流动显示技术 / 333
- 5.5 流场速度测量技术 / 343
- 5.6 流体力学动力量等的实验测量方法 / 352
- 5.7 试验误差分析 / 355

第 6 章 风洞与水洞设备 / 363

- 6.1 风洞设备发展历史 / 364
- 6.2 风洞类型 / 370

- 6.3 低速风洞 / 376
- 6.4 典型低速风洞简介 / 386
- 6.5 超声速风洞 / 404
- 6.6 跨声速风洞 / 407
- 6.7 高超声速风洞 / 419
- 6.8 水洞（或水槽）设备 / 425

第 7 章 飞行奥妙与空气动力学原理 / 431

- 7.1 飞行遐想 / 432
- 7.2 飞行探索性认知 / 437
- 7.3 飞行器的快速发展 / 439
- 7.4 飞行原理 / 445
- 7.5 机翼形状与空气动力系数 / 457
- 7.6 超临界机翼 / 465
- 7.7 机翼翼梢小翼 / 473
- 7.8 细长体机身 / 477
- 7.9 飞机稳定飞行时的力矩与尾翼 / 484
- 7.10 飞机动力需求（发动机） / 485
- 7.11 飞机的增升装置（高升力装置） / 495
- 7.12 飞机起落架 / 512
- 7.13 飞机气动噪声 / 519
- 7.14 超声速飞机 / 525

第 8 章 流体力学人物志 / 533

- 8.1 阿基米德 / 534
- 8.2 达芬奇 / 535
- 8.3 伽利略 / 536

- 8.4 帕斯卡 / 537
- 8.5 牛顿 / 538
- 8.6 莱布尼茨 / 539
- 8.7 伯努利 / 540
- 8.8 欧拉 / 541
- 8.9 达朗贝尔 / 543
- 8.10 拉格朗日 / 544
- 8.11 拉普拉斯 / 545
- 8.12 凯利 / 546
- 8.13 高斯 / 547
- 8.14 泊松 / 548
- 8.15 纳维 / 549
- 8.16 柯西 / 550
- 8.17 圣维南 / 552
- 8.18 泊肃叶 / 553
- 8.19 达西 / 554
- 8.20 弗汝德 / 555
- 8.21 斯托克斯 / 556
- 8.22 亥姆霍兹 / 557
- 8.23 开尔文 / 558
- 8.24 黎曼 / 559
- 8.25 兰利 / 560
- 8.26 马赫 / 561
- 8.27 雷诺 / 562
- 8.28 瑞利 / 563
- 8.29 布辛尼斯克 / 564

- 8.30 拉伐尔 / 566
- 8.31 茹科夫斯基 / 566
- 8.32 李林达尔 / 567
- 8.33 兰姆 / 569
- 8.34 洛伦兹 / 570
- 8.35 莱特兄弟 / 571
- 8.36 兰彻斯特 / 572
- 8.37 普朗特 / 573
- 8.38 卡门 / 574
- 8.39 泰勒 / 576
- 8.40 周培源 / 577
- 8.41 柯尔莫哥洛夫 / 578
- 8.42 惠特尔 / 579
- 8.43 朗道 / 580
- 8.44 郭永怀 / 581
- 8.45 钱学森 / 583
- 8.46 陆士嘉 / 584
- 8.47 沈元 / 586
- 8.48 巴彻勒 / 587
- 8.49 惠特科姆 / 588
- 8.50 莱特希尔 / 589
- 8.51 庄逢甘 / 590

附录 A 湍涡运动随想 / 593

- A.1 湍流啊湍流，我的冤家 / 594
- A.2 一个小小湍涡的生命 / 596

- A.3 悲壮的湍涡记忆性 / 598
- A.4 两个卷绕着湍涡的对话 / 599
- A.5 水调歌头·咏湍涡 / 601
- A.6 小涡的追求与快乐 / 602
- A.7 金缕曲·大涡破碎有感 / 604
- A.8 一次观湖面水涡有感 / 606
- A.9 对湍流无奈的发问? / 607
- A.10 一个湍涡追梦的历程 / 608
- A.11 《天问》与《问湍流》之比拟 / 611

附录 B 我的追梦 / 621

- B.1 我的守望 / 622
- B.2 追梦的人生 / 624
- B.3 我童年的记忆 / 626
- B.4 秋叶辉煌 / 628
- B.5 春雪如花 / 631
- B.6 沁园春·北航绿园 / 635

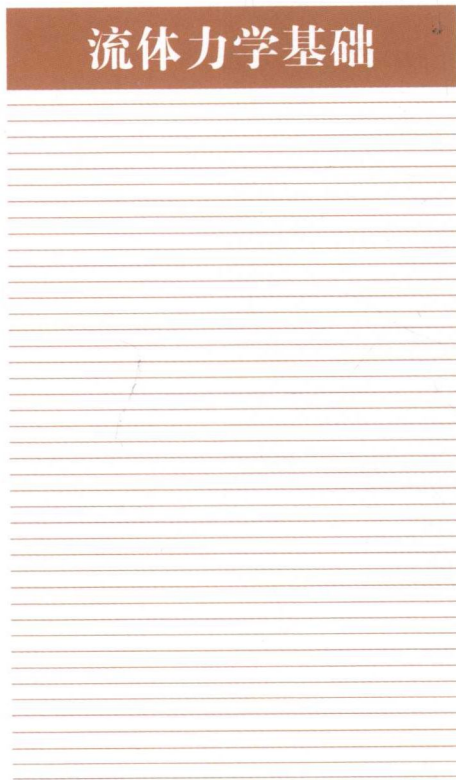
参考文献 / 637

后记 / 644



第 1 章

流体力学基础



1.1

流体力学早期发展与微积分结合

公元前 250 年，受西西里岛叙拉古国王检验皇冠之委托，阿基米德（Archimedes，古希腊人，公元前 287～公元前 212 年，如图 1.1 所示）研究了力平衡原理，提出著名的流体力学浮力定理，也是流体静力学的一部分。这期间苏格拉底、柏拉图、亚里士多德等古希腊科学家的成果主要停留在哲学层面。数学层面有毕达哥拉斯提出万事皆为数

之概念，发现了勾股定律。公元以后直到文艺复兴之前，社会黑暗，科学发展缓慢。文艺复兴时期（公元 14 世纪到公元 17 世纪初），随着新兴资本主义的出现，手工业和机械工业的需求大大促进了数学和力学的发展。在这期间，意大利科学家伽俐略（Galileo Galilei，1564～1642 年，如图 1.2 所示）发现了物体运动的惯性定律，研制了温度计和

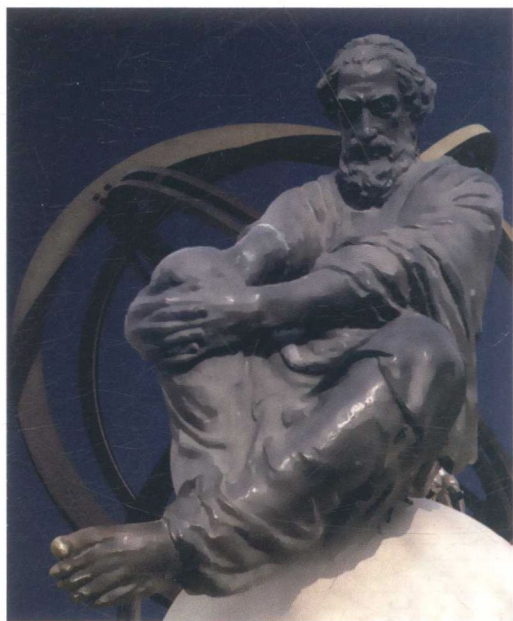


图 1.1 古希腊学者阿基米德（Archimedes，公元前 287～公元前 212 年）

望远镜。意大利全才科学家达芬奇 (Leonardo Di Serpiero Da Vinci, 1452~1519 年, 如图 1.3 所示) 发表了一系列对流动、旋涡、流体机械等定性认知成果, 包括鸟飞行的定性原理, 甚至在多幅画中把旋涡作为美的元素 (如图 1.4 所示)。1653 年法国科学家帕斯卡 (B.Pascal, 1623~1662 年) 提出流体静压力传递原理及帕斯卡定理, 并制成水压机, 后来伽

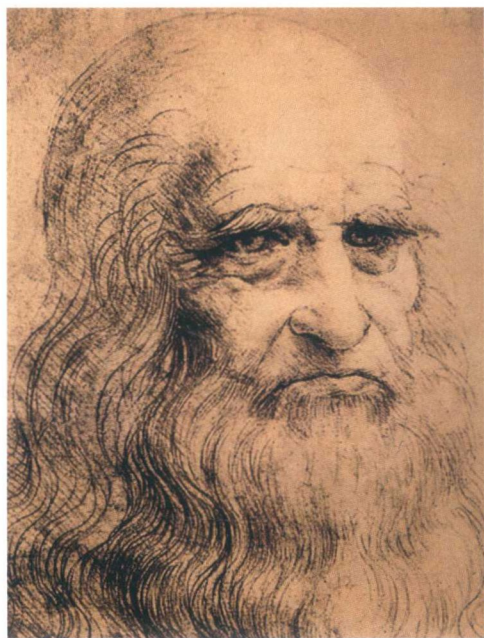


图1.3 意大利全才科学家达芬奇 (Leonardo Di Serpiero Da Vinci, 1452~1519年)

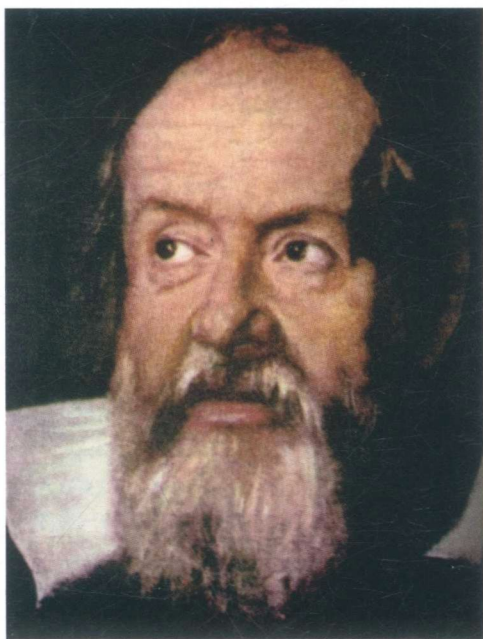


图1.2 意大利科学家伽利略 (Galileo Galilei, 1564~1642年)

俐略和意大利科学家托里拆利 (E.Torricelli, 1608~1647 年) 从大气实验 (1643 年) 中发现了大气压力随高度的变化。这些为经典流体力学理论的建立奠定了基础。但直到 17 世纪后期微积分出现之前, 人类的这些定性认知是碎片化的, 不成体系。应该说, 只有在 17 世纪下叶英国科学家牛顿 (Isaac Newton, 1643~1727 年, 如图 1.5 所示) 和德国科学