

· 高等院校理工类精品教材 ·

Shi Honghui · Wang Chao · Dong Ruoling
Zhang Lite · Jia Huixia · Chen Bo

ELEMENTARY FLUID MECHANICS

流体力学入门

施红辉 / 王超 / 董若凌 / 章利特 / 贾会霞 / 陈波 ● 编著



ZHEJIANG UNIVERSITY PRESS

浙江大学出版社

全国百佳图书出版单位

流体力学入门

Elementary Fluid Mechanics

施红辉 王 超 董若凌 编著
章利特 贾会霞 陈 波



ZHEJIANG UNIVERSITY PRESS
浙江大学出版社

内容简介

本书深入浅出地介绍了流体力学在各领域中的应用,为选修流体力学专业课做铺垫。本书第一章介绍流体力学的历史;第二章介绍生命科学及医疗技术中的流体科学;第三章介绍自然界与生物世界的流体科学;第四章介绍国防军事领域中的流体力学;第五章介绍体育运动中的流体力学;第六章介绍海洋工程、动力工程与环保中的流体力学。本书介绍的知识领域较广,有利于学生扩展知识面,提高学习兴趣。

本书可作为大学一年级学生的公选课教材以及机械、能源、环保、海洋工程、纺织工程、航空航天、工程力学、医学、生物学、体育等相关专业学生的入门教材,也适合教师和一般读者参考。高中三年级学生可在老师的辅导下阅读本书。

图书在版编目(CIP)数据

流体力学入门 / 施红辉等编著. —杭州:浙江大学出版社, 2013. 6

ISBN 978-7-308-11577-3

I. ①流… II. ①施… III. ①流体力学 IV. ①035

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 111349 号

流体力学入门

施红辉 王 超 董若凌 编著
章利特 贾会霞 陈 波

责任编辑 许佳颖 赵黎丽

封面设计 续设计

出版发行 浙江大学出版社

(杭州市天目山路 148 号 邮政编码 310007)

(网址: <http://www.zjupress.com>)

排 版 杭州中大图文设计有限公司

印 刷 德清县第二印刷厂

开 本 787mm×1092mm 1/16

印 张 10.5

彩 插 2 页

字 数 249 千

版 印 次 2013 年 6 月第 1 版 2013 年 6 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-308-11577-3

定 价 28.00 元

版权所有 翻印必究 印装差错 负责调换

浙江大学出版社发行部联系方式: 0571-88925591; <http://zjdxcbbs.tmall.com>

前 言

2006 年开始,作者在浙江理工大学先后为本科生开设《实现环保与节能的流体科学》校际公选课、《流体力学》等专业基础课程。在授课过程中,作者发现,广大学生对流体力学抱有浓厚的兴趣,但对流体力学中无处不在的抽象思维方法的理解感到困难,如势流理论中复变函数的应用、描述流体运动的纳维-斯托克斯微分方程、量纲分析以及坐标变换等。这些困惑不但会降低学生学习流体力学的兴趣,而且让学生进一步学习更高深的流体力学课程时,感到力不从心。

类似的现象也发生在作者曾经任教的日本名古屋工业大学。

始于 20 世纪 90 年代的互联网信息技术革命,已经改变了人们的诸多生活方式。然而,人的抽象思维能力并没有随着互联网信息技术革命的发展而提高,反而在下降。一方面,学生对数学感到畏惧;另一方面,要求大学传授流体力学知识时考虑工业界的需求。以生活中常见的水泵为例,理解沿着叶片流动的流线并对它进行描述,对于掌握水泵工作原理是最基本的。于是,名古屋工业大学机械工程系在大学二、三年级开设专业基础课《流体力学》之前,已在一年级第 2 学期开设《流体力学基础》必修课,深入浅出地讲述流体力学的预备知识,以提高学生的认识水平,帮助他们进入下一阶段的学习。在新加坡大学也有类似的举措,专业基础课被列为《流体力学 II》,而特别为专业基础课再设一门基础课《流体力学 I》,相当于名古屋工业大学的《流体力学基础》。

我国在这方面的教材书籍基本上是空白。虽然已有北京大学周光炯教授著的《史前与当今的流体力学问题》(见第 1 章文献[12])、中国科学院力学研究所沈青研究员等人翻译的库佐夫的《流体世界》(见第 1 章文献[13]),但是它们要么篇幅太短、要么是科普作品,不适合作为大学本科教材。在 2009 年 3 月初,作者应邀给浙江理工大学建筑工程学院本科生举办讲座——“谈谈身边的流体力学”,随后就开始酝酿将讲座幻灯片材料扩展成著作;期间在 2010 年 3 月初,又应邀给浙江大学医学院附属第一医院血管科举办讲座——“动脉血管内血流的流体力学现象及其研究”。原来计划的写作内容包括:流体力学的历史、生命科学及医疗技术中的流体科学、自然界与生物世界的流体科学、国防军事领域中的流体力学、体育运动中的流体力学、海洋工程和动力工程以及环保中的流体力学。后来,由于各种原因,写作工作停滞了两年多的时间。经过这两年多的思考,以及对社会的咨询和校内教学工作的深入,我们感到更有必要写这本书。于是在 2012 年重启本

书的写作,并在原来计划的内容之外,还在第1章第1.5节里简单地介绍了纺织印染行业中的流体力学,目前这个产业是我国以及浙江省的支柱产业之一。

本书的写作贯彻三个原则。第一,不进行数学演绎和推导,尽可能通俗易懂;第二,尽可能介绍当今最新的流体力学成果,特别是伴随计算机技术进步而发展的计算流体力学和先进流体测试技术的成果;第三,在有关章节里,反映出作者们在主持各自的科研项目过程中取得的最新科研成果。这些科研项目包括:国家自然科学基金(51006091, 10802077)、浙江省自然科学基金(Y1090869)、浙江省科技计划公益性技术应用研究项目(2012C21052)、浙江省自然科学基金重点项目(Z1110123)、浙江省提升地方高校办学水平专项资金项目(XK1203-001-S)、浙江理工大学科研启动基金等。当然,写作方式不是科研论文式的,而是浅显地介绍相关成果,使读者感到本书的内容有血有肉、生动而不失根本。本书写作分工如下:由施红辉写第1章,由章利特、陈波、王超、贾会霞、董若凌分别写第2、3、4、5、6章,最后由施红辉检查各章并进行补充、修订。

本书的出版,得到了浙江理工大学机械与自动控制学院学术著作出版经费资助和副院长武传宇教授的大力支持,在此致谢。

作者

2013年1月18日于杭州

E-mail: hhshe@zstu.edu.cn

目 录

第 1 章 绪论及流体力学的历史	1
1.1 绪论	1
1.1.1 学习流体力学的必要性	1
1.1.2 学习流体力学所需的基础	6
1.2 艺术家眼里的流体力学	6
1.3 流体力学的研究历史与人物	9
1.3.1 古希腊人对流体力学的贡献	9
1.3.2 都江堰和古罗马引水渠	10
1.3.3 达·芬奇对湍流的描述	12
1.3.4 中国的火药发明和万户飞天	13
1.3.5 伽利略和牛顿	14
1.3.6 流体动力学的确立	14
1.3.7 波尔茨曼和爱因斯坦	15
1.3.8 雷诺的湍流实验	16
1.3.9 普朗特、冯卡门、钱学森	17
1.4 微纳米 MEMS 技术可能是解决流体力学难题的钥匙	19
1.5 技术进步促进流体力学发展	19
参考文献	21
第 2 章 生命科学与医疗技术中的流体科学	23
2.1 心血管疾病相关的流体科学	23
2.1.1 血液流变性	23
2.1.2 血液循环流动	25
2.1.3 心血管疾病与防治	33
2.2 人体损伤与防护中的流体科学	38
2.2.1 冲击波损伤	38
2.2.2 高压水枪损伤	38
2.2.3 油锅起火与飞溅灼伤	40
2.3 医疗技术中的流体科学	41

2.3.1	超声波治疗	41
2.3.2	体外冲击波碎石	42
2.3.3	注射治疗	43
2.3.4	水刀手术	44
2.4	与人体血压有关的一个故事	45
	参考文献	47
第3章	自然界的流体科学	50
3.1	自然现象中的流体科学	50
3.1.1	海啸	50
3.1.2	风暴	53
3.1.3	结语	58
3.2	生物界的流体科学	58
3.2.1	飞行生物	58
3.2.2	游动生物	65
3.2.3	能够在水面上行走的生物	67
3.2.4	鸟类冲击入水捕鱼和射水鱼捕食	70
3.3	结语	71
	参考文献	72
第4章	国防军事领域中的流体力学	78
4.1	航空航天飞行器的空气动力学	78
4.1.1	空气、声速和马赫数	80
4.1.2	飞机的空气动力学	86
4.2	舰船的推进与静音问题	97
4.2.1	螺旋桨推进原理	99
4.2.2	螺旋桨空化及空化噪声	100
4.2.3	潜艇综合噪声控制	102
4.3	武器发射、爆炸和冲击时的激波	104
4.4	水中兵器的水动力学问题	106
	参考文献	111
第5章	体育运动中的流体力学	113
5.1	球类运动	114
5.1.1	足球中的任意球	114
5.1.2	排球中的飘球	116
5.1.3	麻脸的高尔夫球	119
5.2	标枪	121

5.3 自行车运动	126
5.4 游泳运动	129
5.5 水上项目——赛艇和皮划艇	131
5.6 结语	133
参考文献	134
第6章 海洋工程、动力工程与环保中的流体力学	136
6.1 海洋工程中的流体力学	136
6.1.1 洋流	136
6.1.2 海上平台	138
6.1.3 海洋工程结构的气蚀	141
6.2 动力工程中的流体力学	143
6.2.1 燃气轮机气膜冷却	143
6.2.2 动力系统测量技术中的流体力学问题	148
6.3 环保领域的流体力学	153
6.3.1 大气污染的控制	153
6.3.2 水污染的控制	156
参考文献	157

第1章 绪论及流体力学的历史

1.1 绪 论

1.1.1 学习流体力学的必要性

流体力学与人们的日常生活密切相关。在中国的常用语中有很大部分与流体相关,如“水滴石穿”、“惊涛骇浪”、“风卷残云”等。中国文人在吟诗作词时,也离不开流体。《诗经》中有“关关雎鸠,在河之洲”;李白有诗曰:“长风破浪会有时,直挂云帆济沧海”;毛泽东主席也有词曰:“鹰击长空,鱼翔浅底,万类霜天竞自由”,以及“可上九天揽月,可下五洋捉鳖”。书圣王羲之在《兰亭集序》中写道:“又有清流激湍,映带左右,引以为流觞曲水”,流体力学中的中文专用术语“湍流”,正是源于此。

进入21世纪,中国社会经济快速发展,从资源消耗型向创新型国家转型,流体力学在各行各业中广泛应用。本小节列举几个实例,以说明学习流体力学的必要性。

1.1.1.1 高铁动车组卷吸人事件

2007年4月22日,在广深线上,高速运行的动车组卷吸路边施工的铁路工人,造成2死4伤^[1]。2008年1月23日,在胶济线上,D59次动车组冲撞卷吸正在准备作业的施工人员,造成18死9伤^[2]。

为什么动车组会将铁路两旁的人卷吸进来呢?CRH3型和CRH380A型动车组(见图1.1和图1.2)的运行速度都达到了350 km/h,即97.2 m/s。根据伯努利方程^[3],沿着流线的压力与速度头之和为常数,即

$$p + \frac{1}{2}v^2 = \text{const} \quad (1.1)$$

式中, p 是压力, v 是动车组的速度。当动车组以接近100 m/s的速度运行时,动车组周围的压力很低,相当于形成了一个真空。因此,动车组通过的时候能把周围的人和物吸进来,必须在高铁铁轨两侧安装防护栏。

1.1.1.2 四川甘孜州道孚县草原火灾

2010年12月5日中午,四川省甘孜州道孚县发生草原火灾^[4](见图1.3),当地政府和驻地武警部队迅速组织人力进行灭火。到下午3点半,明火已被扑灭,此时参战武警官兵正在山坡上休息。突然间大风吹向谷底,正在谷底处理暗火的群众迅速被大火包围。听到群众的哭喊声,武警教导员立即带领战士冲向谷底抢救群众。不料风势渐猛,并引燃



图 1.1 CRH3 型动车组

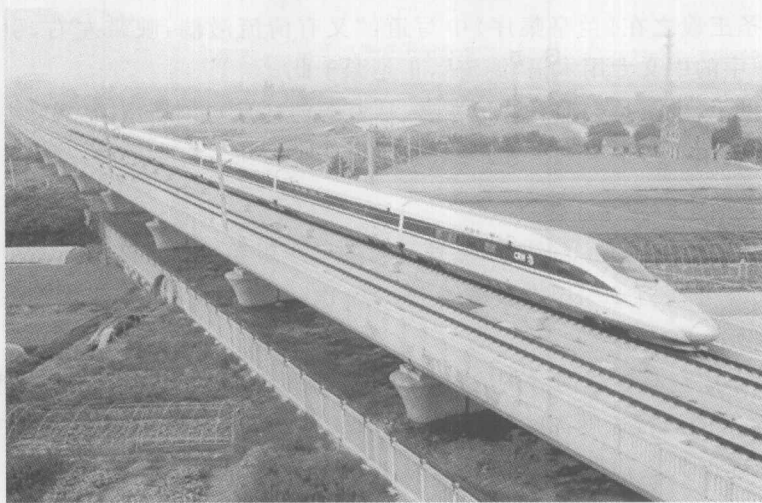


图 1.2 CRH380A 型动车组

对面的山坡,17 名救火人员遇难。

道孚县山高谷深,东部雪山海拔高达 5820 m,南端河谷最低处有 2670 m;而且山势陡峭,一般都有七八十度以上。此类地形地貌易形成山谷风。

山谷风的形成原理跟海陆风类似^[6]。白天,山坡接受太阳光热较多,成为一只小小的“加热炉”,空气增温较多;而山谷上空,同高度上的空气因离地较远,增温较少。于是山坡上的暖空气不断上升,并在上层从山坡流向谷地,谷底的空气则沿山坡向山顶补充,这样便在山坡与山谷之间形成一个热力环流。下层风由谷底吹向山坡,称为谷风(见图 1.4(a))。到了夜间,山坡上的空气受山坡辐射冷却影响,“加热炉”变成了“冷却器”,空气降温较多;

而谷地上空,同高度的空气因离地面较远,降温较少。于是山坡上的冷空气因密度大,顺山坡流入谷地,谷底的空气因汇合而上升,并从上层向山顶上空流去,形成与白天相反的热力环流。下层风由山坡吹向谷地,称为山风(见图 1.4(b))。而高原地区气候变化较快,下午就会形成山风。

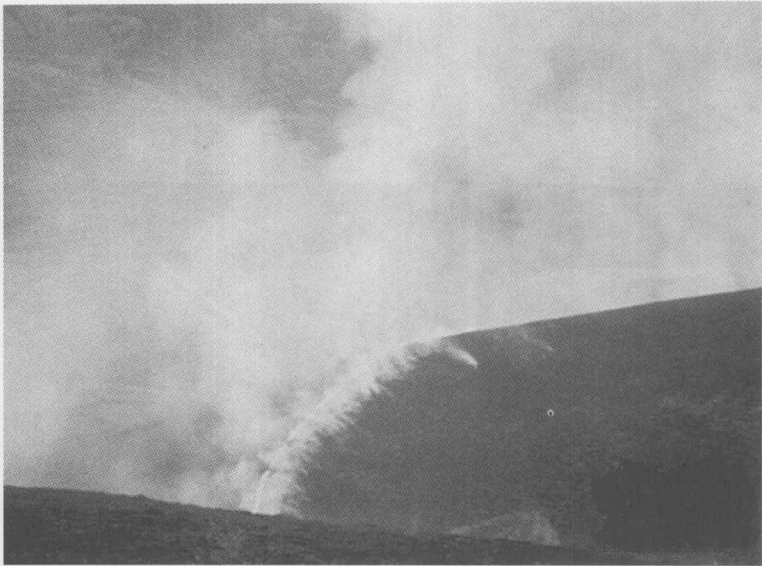


图 1.3 四川甘孜州道孚县草原火灾

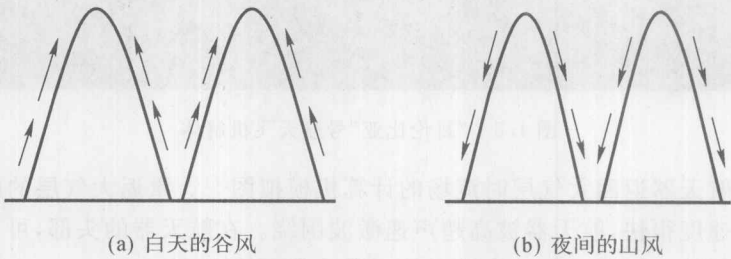


图 1.4 山谷风的机理

那么,山谷风的速度有多大呢? 假定山顶的冷空气自由落体降到谷底,根据伽利略定律

$$\begin{cases} h = \frac{1}{2}gt^2 \\ v = gt \end{cases} \quad (1.2)$$

式中, h 是山峰高度; t 是经过距离 h 所用的时间; g 为重力加速度,取为 9.8 m/s^2 ; v 是山风到达谷底时的速度。事实上,冷空气的下降不是自由落体,它要受到山坡表面边界层的影响,此外还要考虑与周围流体的湍流混合和扩散等因素。速度估计为式(1.2)得出的值的 $1/10$ 比较合理,即若 $h=100 \text{ m}$,风速为 14 m/s ,相当于 7 级大风。已有资料表明^[6],山风的风速可达 $7\sim10 \text{ m/s}$ 。人员进入这么高风速下的火灾现场,后果可想而知。因此,在

山谷地区灭火,一定要防范山谷风的突袭。

1.1.1.3 “哥伦比亚”号航天飞机失事

2003年2月1日,载有7名宇航员的美国“哥伦比亚”号航天飞机在结束了为期16天的太空任务之后返回地球,但在着陆前发生意外,航天飞机解体坠毁(见图1.5)。据美国宇航局的调查,“哥伦比亚”号失事原因是:外挂燃料箱隔热泡沫脱落。尽管这块泡沫仅重0.77 kg,还是在“哥伦比亚”号左翼防热瓦上砸了个小洞。“哥伦比亚”号带着这个洞在太空飞行了16天后,在降落时,与大气层摩擦所产生的巨大热量透过这个洞进入机体,引起爆炸。

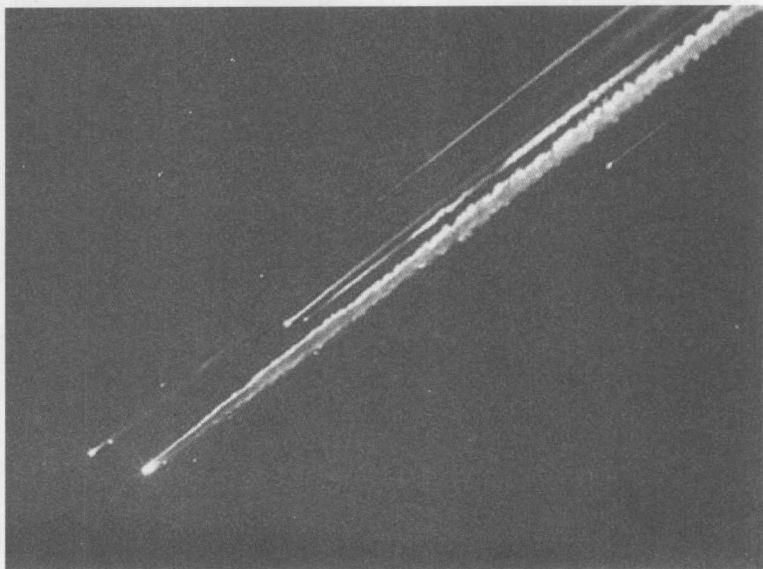


图 1.5 “哥伦比亚”号航天飞机解体

图1.6是航天器返回大气层时流场的计算机模拟图^[7]。重返大气层的航天器在地球引力的作用下速度很快,航天器被高超声速激波围绕。在航天器的头部,可以认为激波与物体表面是平行的。根据空气动力学中的正激波关系式^[8],有

$$\frac{T_s}{T_\infty} = \left(\frac{\gamma-1}{\gamma+1} \right)^2 \left(\frac{2\gamma}{\gamma-1} M^2 - 1 \right) \left(\frac{2}{\gamma-1} \frac{1}{M^2} + 1 \right) \quad (1.3)$$

式中, T_∞ 是大气温度; T_s 是激波后的温度; M 是航天器的马赫数,等于速度除以声速; γ 是空气的气体绝热指数,通常为1.4。

考虑在高空离地59 km处,周围空气的温度为 $T_\infty=258$ K,航天器的马赫数 $M=36$,由式(1.3)计算理论激波后的温度 $T_s=65248$ K。考虑真实气体效应后, T_s 约为11000 K。这个温度已接近太阳表面的温度,所以“哥伦比亚”号航天飞机在失去防热瓦的保护之后,激波后的高热量很快就击穿机体的金属结构,导致航天飞机完全解体。

1.1.1.4 日本福岛核电站核泄漏事故

2011年3月11日,日本东北部宫城县发生9级地震和海啸,位于宫城县南边的福岛第一核电站的反应堆,在地震发生时启动了安全措施,反应堆自动关闭。然而,巨大的海

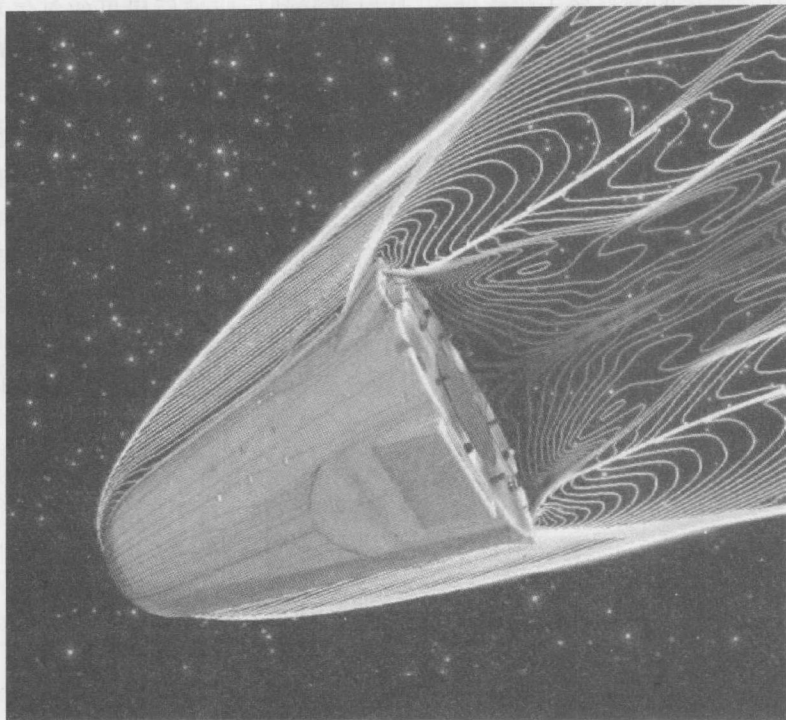


图 1.6 航天器返回大气层时流场的计算机模拟

啸越过防波堤,冲进发电厂,使得反应堆冷却系统停机,反应堆内部温度很快上升,最后厂房被炸毁(见图 1.7),放射性物质随之外泄,造成了世界范围的恐慌。

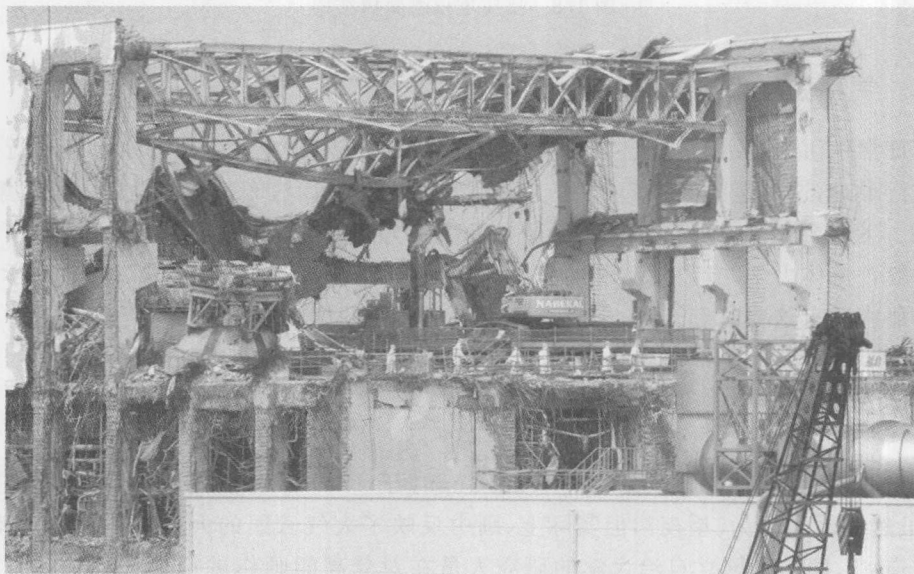


图 1.7 因爆炸而毁坏的福岛核电站厂房

福岛核电站发生的爆炸属于化学爆炸,是由泄漏到反应堆厂房里的氢气和空气中的氧气混合后引发的爆轰。图 1.8 为反应堆核燃料棒的结构示意图^[9],圆柱形的核燃料装在金属筒里,燃料棒外壳为锆合金。地震和海啸导致应急冷却系统故障,反应堆内冷却水平面一度下降,并导致堆芯裸露。冷却不足使燃料棒外壳温度超过锆-水反应极限温度,从而发生锆-水反应,生成大量氢气。堆芯锆-水反应生成的氢气曾一直封闭在厂房中的安全壳内,安全壳内压力不断升高,氢气从泄压安全阀的气体通道泄漏到厂房。当氢气与空气中氧气的混合浓度达到爆炸极限后,遇到高温或明火便发生了爆轰。爆轰的威力掀掉了厂房的屋顶,只剩下钢筋骨架。作者认为,在 9 级强震的作用下,厂房建筑物已出现裂缝,外部空气可进入厂房;当反应堆内的氢气大量泄漏时,厂房里有足够的氧气与之形成临界的氢氧混合气体。关于气体爆轰的机理和威力,加拿大麦吉尔大学的 John Lee 教授已有详述^[10,11]。

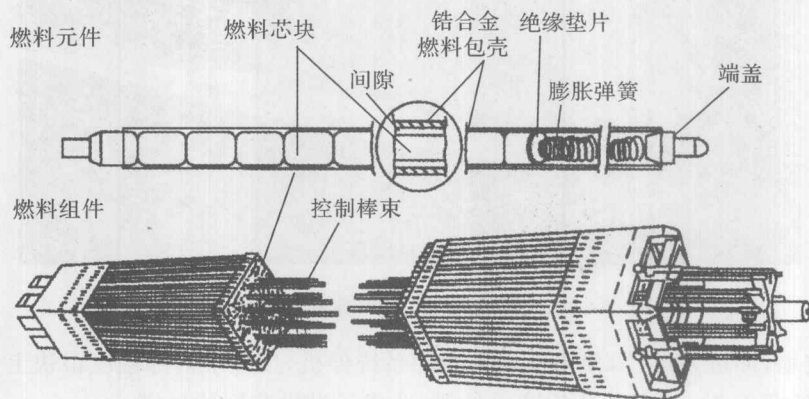


图 1.8 反应堆核燃料棒结构

1.1.2 学习流体力学所需的基础

在日常生活中,我们可以自由自在地在道路上散步;但如果是在游泳池里步行,则会感到步行艰难,这就是阻力在起作用。一切运动的物体,如汽车、火车、轮船等都要解决阻力问题。飞机要上天,除阻力问题外,还要解决升力问题,这应该说就是流体力学了。

一般,“流体力学”专业基础课的先导课程是“大学物理”、“高等数学”和“热力学”。本书面向那些没有这些基础知识,但具有一定科学背景的读者。

1.2 艺术家眼里的流体力学

图 1.9 是荷兰印象派画家梵高(Van Gogh)于 1889 年在法国南部创作的名画《星夜》。虽然油画题目为《星夜》,但实际上,画中反映了大气云团的大涡和小涡的运动。有媒体报道^[14],墨西哥国立自治大学的研究人员在对梵高的画作进行数学分析后发现,在画能找到湍流的经典数学模型的影子,与柯尔莫哥洛夫提出的湍流公式几乎一致。

湍流问题曾被称为流体力学中最后的难题。湍流涉及从微观到宏观多时空尺度上的



图 1.9 梵高的油画《星夜》

运动,它不仅和周围进行能量交换,其内部也存在各式各样的能量交换。几个世纪以来,众多科学家一直试图用精确的数学模型来描述湍流现象,然而这个被视为比量子力学理论还要深奥的难题,至今依然没有人能够解决。如今的现代湍流理论,其中一个重要的基础理论,还是前苏联科学家柯尔莫哥洛夫(Kolmogorov)在 20 世纪 40 年代提出的。

湍流中存在着大涡和小涡。大涡的应变率及其结构变化较小且占据着主流的大部分能量,其流动性质是各向异性的,即能量在笛卡尔直角坐标系的 x 、 y 、 z 三个方向上是不一样的。小涡的应变率较大,在大涡将能量传递给小涡后,小涡以黏性耗散的形式将这些能量消耗掉;小涡的运动可近似地被认为是各向同性的。如果大涡的尺寸为 l ,这基本上是主流的尺度,如圆管的直径或方管的高度。柯尔莫哥洛夫提出湍流的最小尺度为^[15]:

$$\eta = (\nu^3/\epsilon)^{1/4} \tag{1.4}$$

式中, ν 是流体的运动黏度 (m^2/s); ϵ 是流体的单位质量能量耗散率 (m^2/s^{-3})。通过推导可得 l 和 η 之间的关系为^[15]:

$$\frac{l}{\eta} \sim \text{Re}_l^{3/4} \tag{1.5}$$
$$\text{Re}_l = \frac{ul}{\nu}$$

式中, Re_l 是大涡的雷诺数; u 是流体的流动速度。湍流的雷诺数很大,用代数式来表示就是 $\text{Re}_l \gg 1$,因此大涡尺寸比小涡尺寸大很多,小涡的局部各向同性近似成立,这就是柯尔莫哥洛夫理论的基本思想。

图 1.10 是日本浮世绘画家葛饰北斋(Katsushika Hokusai)在 1831 年创作的版画《巨浪》。画中远景是富士山,近景是在巨浪间穿行的邮船。从画中可以看出,木船在冲浪时,船上的人员全部匍匐着、将身体紧贴船体,以防身体惯性将他们甩出船外。葛饰北斋捕捉到了浪尖的流体撕裂成水花的瞬间景象。这实际上是一种耗散过程,因此浪的高度

总是有限的。已故加拿大多伦多大学 Glass 教授在他的名著 *Shock Wave and Man* 里引用了这幅画^[16], 以说明激波的形成和巨浪形成之间的相似性。

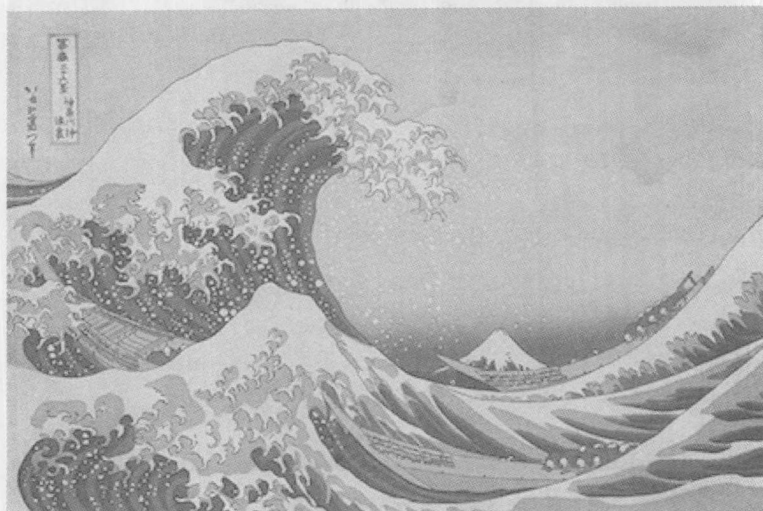


图 1.10 葛饰北斋的版画《巨浪》

图 1.11 是澳大利亚阿德莱德大学门前广场上的雕塑作品。14 个铸铁墩按圆形布置, 远看让人以为是供行人休息的铁凳子, 近看才知道每个铁墩中心有水流出, 水流覆盖整个铁墩表面, 形成了 14 个镜面, 十分吸引人。图 1.12 是英国德文郡卡文迪许 (Cavendish) 公爵家花园里的喷泉。该喷泉是利用花园北面的 200 m 高的山坡蓄水, 通过管路将水引入花园, 水的势能转换成喷泉喷口的动能, 从而形成喷泉。英国剑桥大学卡文迪许实验室的创始人, 就来自于这个家族。这两个都是因流体力学而使景观更具观赏性的典型例子。



图 1.11 注水铁墩雕塑



图 1.12 依靠水的势能产生的喷泉

1.3 流体力学的研究历史与人物

1.3.1 古希腊人对流体力学的贡献

流体力学是力学学科的一个分支。莫里斯·克莱因(Morris Kline)在他的著作《古今数学思想》中指出,希腊人开创了力学这门学科^[17]。现今在教科书中仍然使用的流体静力学,便是古希腊数学物理学家阿基米德(Archimedes)(见图 1.13)奠定的。

据说,国王定做了一顶金王冠,交货后他怀疑工匠在其中掺杂了其他便宜的金属,于是就让阿基米德在不能损坏王冠的前提下测定王冠是否是纯金的。一天,阿基米德在浴池里洗澡时看到他的身体在水中浮了起来,突然发现了解决问题的方法:浸在水里的物体所受的浮力等于其排开的那部分水的重量,由此可测定王冠的成分。

阿基米德发现的正是浮力定理。设 W 是王冠的重量,拿一块重量为 W 的纯金放在水里称,纯金就要减轻 F_1 的重量,即所排开的水的重量;一块重量为 W 的纯

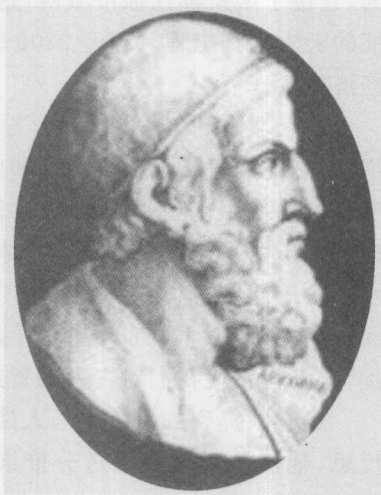


图 1.13 阿基米德