

21世纪全国应用型本科 土木建筑 系列实用规划教材

流体力学

[第2版]

主 编◎章宝华 刘源全



- 结合工程实际，侧重应用能力培养
- 注意与关联课程的融合，明确重点和难点



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

013070385

035-43
12-2

21 世纪全国应用型本科土木建筑系列实用规划教材

流体力学(第 2 版)

主 编 章宝华 刘源全
副主编 刘建军 陈 文



035-43

12-2



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS



北航

C1678878

内 容 简 介

本书根据高等学校土木工程专业的流体力学教学基本要求和注册结构工程师考试对流体力学的要求编写而成。全书主要内容包括：绪论、流体的宏观模型和物理属性、流体静力学、流体动力学基础、流动阻力和能量损失、孔口管嘴出流与管路水力计算、明渠恒定均匀流、堰流、渗流、流体力学实验等。各章都选编了一定数量的例题和习题。

本书结构严谨、说理浅显、叙述详细、例题较多、便于自学，可作为土木工程、给排水工程、建筑环境与能源应用工程等专业的教材，也可作为从事相关专业的工程技术人员的学习参考书。

图书在版编目(CIP)数据

流体力学/章宝华，刘源全主编。—2版。—北京：北京大学出版社，2013.9

(21世纪全国应用型本科土木建筑系列实用规划教材)

ISBN 978-7-301-23083-1

I. ①流… II. ①章…②刘… 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(2013)第 198807 号

书 名：流体力学(第2版)

著作责任者：章宝华 刘源全 主编

策划编辑：卢东 吴迪

责任编辑：卢东

标准书号：ISBN 978-7-301-23083-1/TU·0358

出版发行：北京大学出版社

地 址：北京市海淀区成府路 205 号 100871

网 址：<http://www.pup.cn> 新浪官方微博：@北京大学出版社

电子信箱：pup_6@163.com

电 话：邮购部 62752015 发行部 62750672 编辑部 62750667 出版部 62754962

印 刷 者：北京鑫海金澳胶印有限公司

经 销 者：新华书店

787 毫米×1092 毫米 16 开本 12.5 印张 286 千字

2006 年 2 月第 1 版

2013 年 9 月第 2 版 2013 年 9 月第 1 次印刷(总第 3 次印刷)

定 价：25.00 元

未经许可，不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有，侵权必究

举报电话：010-62752024

电子信箱：fd@pup.pku.edu.cn

第2版前言

本书自2006年第1版出版以来,有关使用院校反映良好。为了更好地开展教学,适应应用型大学的土建类专业大学生学习的要求和注册结构工程师考试对流体力学知识的要求,秉承培养卓越土木工程师的宗旨,我们对本书进行了修订。

这次修订主要做了以下工作。

1. 对全书的版式进行了全新的编排,增加了教学目标、教学要求、引言,增补了部分新的内容。

2. 修改了第1版中编写和排版中的错误。

根据当前教育改革的要求,在编写过程中做了如下努力。

(1) 本书注重流体力学与后续专业课和实际工程的联系,加强了应用能力培养的内容。

在流体力学教学内容、例题、习题中加入了与后续专业课、实际工程有关的内容,始终突出“理论联系实际”的方针,注重针对性、实用性和先进性。

(2) 本书注重对流体力学知识的分类、分层。

在流体力学例题、思考题、选择题、计算题中把问题分成若干个类型,每种类型由浅至深,紧紧围绕专业和工程实际,培养学生学习和应用能力。

(3) 注重与相关课程的关联融合。明确知识点的重点和难点,注意“流体力学”与“材料力学”“水力学”“土力学”等课程的关联性,做到新旧知识内容的融合和综合运用。

(4) 注重知识体系实用有效。以学生就业所需的专业知识和实验技能为着眼点,既强调基础知识与理论体系的完整性,也着重讲解应用型人才培养所需的内容和关键点,突出实用性和可操作性。

本书第2版由南昌工程学院章宝华,西南石油大学刘建军,南华大学刘源全,中南林业科技大学陈文共同编写。全书内容经编者共同讨论,分工执笔情况为:第1章、第2章、第6章、第7章由章宝华编写,第3章、第4章、第5章由刘源全编写,绪论由刘建军编写,第8章、第9章由陈文编写。全书由章宝华、刘源全任主编,刘建军、陈文任副主编,章宝华负责全书的统稿工作。

对本书存在的不足,欢迎广大同行批评指正。

编者

2013年6月

第 1 版前言

本教材是参照教育部教学指导委员会土木专业流体力学大纲和注册结构工程师考试对流体力学知识的要求,按照多学时的授课时间编写的。本书可作为高等学校土建类本、专科的试用教材或教学参考书。

流体力学是土建类专业的一门重要的专业基础课。本课程的任务是系统介绍流体的力学性质、流体力学的基本概念和观点、基础理论和常用分析方法、有关的工程应用知识等;培养学生具有对简单流体力学问题的分析和求解能力,掌握一定的实验技能,为今后学习专业课程,从事相关的工程技术和科学研究工作打下坚实基础。

本书由武汉工业学院刘建军、赵万华,南昌工程学院章宝华,南华大学刘源全,长江大学马成松,河北建筑科技大学的朱长军,中南林学院的陈文共同编写。全书内容经编者共同讨论,分工执笔情况为:刘建军编写绪论、第 1 章、第 3 章,马成松编写第 2 章,刘源全编写第 4 章,赵万华编写第 5 章,章宝华编写第 6 章、第 7 章,朱长军编写第 8 章,陈文编写第 9 章。全书由刘建军、章宝华主编,刘建军统稿审定。

本书由辽宁工程技术大学梁冰教授审阅,提出了许多宝贵意见。在本书的编写过程中,武汉工业学院研究生纪佑军、刘启强等同学绘制了书稿的部分插图,并参与了书稿的校对工作,在此一并致谢。

限于编者水平,同时编写时间也比较仓促,不妥之处恳请读者批评指正。

编 者

2005 年 9 月

目 录

绪论	1
----------	---

第 1 章 流体的宏观模型和物理属性 ...	9
------------------------	---

1.1 流体的连续介质假设	10
1.2 流体的主要物理性质	11
1.2.1 惯性	11
1.2.2 压缩性和膨胀性	11
1.2.3 粘性	13
1.2.4 液体的表面张力和毛细现象	17
1.3 非牛顿流体	18
习题	19

第 2 章 流体静力学	22
-------------------	----

2.1 流体静压强及其特性	23
2.1.1 流体静压强	23
2.1.2 静止流体中应力的特征 ...	23
2.2 欧拉平衡微分方程	24
2.2.1 平衡微分方程	24
2.2.2 平衡微分方程的全微分 ...	26
2.2.3 等压面的概念	26
2.3 流体静压强的分布规律	26
2.3.1 静压强基本方程	26
2.3.2 测压管高度	28
2.4 压强的计算标准和度量单位	29
2.4.1 计算标准	29
2.4.2 度量单位	30
2.5 作用于平面的液体压力	30
2.5.1 解析法	31
2.5.2 图算法	33
2.6 作用于曲面的液体压力	34
2.6.1 曲线上的液体总压力	34

2.6.2 压力体	36
2.7 相对静止状态下流体的压力	36
2.7.1 等加速直线运动容器中液体的平衡	36
2.7.2 等角速度旋转容器中液体的平衡	38
习题	39
第 3 章 流体动力学基础	45
3.1 流体运动的描述方法	46
3.1.1 拉格朗日法(跟踪法)	46
3.1.2 欧拉法(布哨法)	47
3.2 流场的基本概念	48
3.2.1 恒定流与非恒定流	48
3.2.2 流线和迹线	49
3.2.3 元流和总流	50
3.2.4 过流断面	50
3.2.5 一元流、二元流及三元流	51
3.3 流体运动的连续性方程	51
3.3.1 恒定流的连续性方程	51
3.3.2 三维流动的连续性方程 ...	53
3.4 理想流体运动的微分方程式	54
3.5 伯努利积分及能量方程	56
3.5.1 理想流体运动微分方程的积分	56
3.5.2 重力作用下理想流体的伯努利方程	57
3.5.3 总流的伯努利方程	58
3.5.4 粘性流体总流的伯努利方程	60
3.6 动量方程	61
习题	63



第4章 流动阻力和能量损失	67	5.1.1 小孔口出流	103
4.1 沿程损失和局部损失	68	5.1.2 大孔口出流	105
4.1.1 流动阻力和能量损失的分	68	5.2 管嘴出流	105
4.1.2 能量损失的计算公式	68	5.2.1 管嘴出流流量公式	105
4.2 层流、紊流与雷诺数	69	5.2.2 圆柱形管嘴内的真空度	106
4.2.1 雷诺实验	69	5.2.3 其他类型管嘴出流	106
4.2.2 两种流态的判别标准	70	5.3 简单管路	107
4.2.3 流态分析	71	5.3.1 短管计算	107
4.2.4 粘性底层	72	5.3.2 长管计算	109
4.3 圆管中的层流运动	73	5.4 管路的串联和并联	110
4.3.1 均匀流基本方程	73	5.4.1 串联管道	110
4.3.2 圆管层流的速度分布、沿程损失	75	5.4.2 并联管道	111
4.4 圆管中的紊流运动	77	5.4.3 管网	112
4.4.1 紊流运动的特征	77	习题	114
4.4.2 紊流切应力、普朗特混合长度理论	78	第6章 明渠恒定均匀流	117
4.4.3 圆管紊流流速分布	80	6.1 明渠均匀流的特性及其计算公式	118
4.5 管路中的沿程阻力	81	6.1.1 明渠的类型	118
4.5.1 沿程阻力系数及其影响因素的分析	81	6.1.2 明渠均匀流形成的条件及其特性	120
4.5.2 尼古拉兹实验	81	6.1.3 明渠均匀流的计算公式	121
4.5.3 沿程阻力系数 λ 的计算公式	83	6.1.4 水力最佳断面	123
4.6 管路中的局部阻力	88	6.1.5 渠道允许流速	124
4.6.1 局部水头损失发生的原因	88	6.2 简单断面明渠均匀流的水力计算	125
4.6.2 弯管的局部损失	90	6.2.1 验算渠道的输水能力	125
4.6.3 三通管的局部损失	90	6.2.2 确定渠道底坡	125
4.6.4 圆管突然扩大的局部水头损失	91	6.2.3 确定渠道的断面尺寸	125
4.7 边界层的基本概念及绕流阻力	93	6.3 无压圆管均匀流的水力计算	128
4.7.1 边界层的基本概念	93	6.3.1 无压圆管均匀流水力的最佳充满度	129
4.7.2 边界层的分离	95	6.3.2 无压圆管均匀流的水力计算方法	131
4.7.3 物体的绕流阻力	96	6.4 粗糙系数变化及复式断面明渠均匀流的水力计算	133
习题	98	6.4.1 粗糙系数变化的明渠均匀流的水力计算	133
第5章 孔口管嘴出流与管路水力计算	102		
5.1 孔口出流	103		

6.4.2 复式断面明渠均匀流的水力计算	133	9.2.2 实验设备及测量仪器	180
习题	135	9.2.3 实验原理	181
第7章 堰流	137	9.2.4 实验方法与步骤	181
7.1 堰流的定义及类型	138	9.2.5 注意事项	181
7.1.1 堰流的定义	138	9.2.6 资料整理与结果分析	182
7.1.2 堰流的类型	138	9.2.7 思考题	182
7.2 堰流的水力计算	140	9.3 文丘里流量计实验	183
7.2.1 薄壁堰的水力计算	140	9.3.1 实验目的	183
7.2.2 实用堰的水力计算	142	9.3.2 实验设备及测量仪器	183
7.2.3 宽顶堰的水力计算	152	9.3.3 实验原理	183
习题	158	9.3.4 实验方法与步骤	184
第8章 渗流	160	9.3.5 注意事项	184
8.1 渗流的基本概念	161	9.3.6 资料整理与结果分析	184
8.1.1 多孔介质与渗流	161	9.3.7 思考题	185
8.1.2 渗流基本定律	162	9.4 雷诺实验	185
8.2 渗流在井流中的应用	165	9.4.1 实验目的	185
8.2.1 潜水完整井	165	9.4.2 实验设备及测量仪器	185
8.2.2 承压完整井	166	9.4.3 实验原理	186
8.2.3 因次分析和相似原理	167	9.4.4 实验方法与步骤	186
8.2.4 相似准则	170	9.4.5 注意事项	186
8.3 岩土工程中的渗流问题	172	9.4.6 资料整理与结果分析	186
8.3.1 岩体与土体渗流的区别	172	9.4.7 思考题	187
8.3.2 岩体的渗流问题	173	9.5 动量方程实验	187
习题	175	9.5.1 实验目的	187
第9章 流体力学实验	176	9.5.2 实验设备及测量仪器	187
9.1 水静力学实验	177	9.5.3 实验原理	188
9.1.1 实验目的	177	9.5.4 实验方法与步骤	188
9.1.2 实验设备及测量仪器	177	9.5.5 资料整理与结果分析	188
9.1.3 实验原理	178	9.5.6 思考题	189
9.1.4 实验方法与步骤	178	9.6 管流的沿程阻力实验	189
9.1.5 注意事项	179	9.6.1 实验目的	189
9.1.6 资料整理与结果分析	179	9.6.2 实验设备及测量仪器	189
9.1.7 思考题	180	9.6.3 实验原理	190
9.2 不可压缩恒定流能量方程实验	180	9.6.4 实验方法与步骤	190
9.2.1 实验目的	180	9.6.5 注意事项	190
		9.6.6 资料整理与结果分析	191
		9.6.7 思考题	191
		参考文献	192

绪论

绪论

绪论



在学习流体力学这门课程之前,本绪论将主要回答以下几个问题:什么是流体力学?它的主要研究内容是什么?为什么要学习流体力学?流体力学的发展历史、研究方法,以及怎样学好流体力学?使同学们对流体力学有一个大致的了解,帮助学生在以后的学习中掌握流体力学的主要脉络和学习方法。

一、流体力学的概念及其研究内容

流体力学(fluid mechanics)是力学的一个独立分支。它是研究流体的平衡和流体的机械运动规律及其在工程实际中应用的一门学科。流体力学的研究对象是流体,包括液体和气体。在力学研究中,根据研究对象的不同,一般可分为:以受力后不变形的绝对刚体为研究对象的理论力学;以受力后产生微小变形的固体为研究对象的固体力学;以受力后产生较大变形的流体为研究对象的流体力学。

流体是液体和气体的总称。在人们的生活和生产活动中随时随地都可遇到流体,所以流体力学与人类日常生活和生产事业密切相关。它是一门应用较广的科学,航空航天、水运工程、流体机械、给水排水、水利工程、化学工程、气象预报及环境保护等学科均以流体力学为其重要的理论基础。

20世纪初,世界上第一架飞机出现以后,飞机和其他各种飞行器得到迅速发展。20世纪50年代开始的航天飞行,使人类的活动范围扩展到其他星球和银河系。航空航天事业的蓬勃发展是同流体力学的分支学科——空气动力学和气体动力学的发展紧密相联的。这些学科是流体力学中最活跃、最富有成果的领域。

石油和天然气的开采,地下水的开发利用,要求人们了解流体在多孔或缝隙介质中的运动,这是流体力学分支之一——渗流力学研究的主要对象。渗流力学还涉及土壤盐碱化的防治,化工中的浓缩、分离和多孔过滤,燃烧室的冷却等技术问题。

燃烧离不开气体,燃烧过程中涉及许多有化学反应和热能变化的流体力学问题是物理—化学流体动力学的内容之一。爆炸是猛烈的瞬间能量变化和传递过程,涉及气体动力学,从而形成了爆炸力学。

沙漠迁移、河流泥沙运动、管道中煤粉输送、化工中气体催化剂的运动等,都涉及流体中带有固体颗粒或液体中带有气泡等问题,这类问题是多相流体力学研究的范围。

等离子体是自由电子、带等量正电荷的离子及中性粒子的集合体。等离子体在磁场作用下有特殊的运动规律。研究等离子体的运动规律的学科称为等离子体动力学和电磁流体力学,它们在受控热核反应、磁流体发电、宇宙气体运动等方面有广泛的应用。

生物流变学研究人体或其他动植物中有关的流体力学问题,例如血液在血管中的流动,心、肺、肾中的生理流体运动和植物中营养液的输送。此外,还研究鸟类在空中的飞翔,动物在水中的游动等。

在土木工程中,流体力学也得到了广泛的应用。在给水排水工程中,无论是管网流量计算、管网设计还是渠道开挖、水泵选型等都需要解决一系列流体力学问题;在建筑暖通工程中,热风采暖、冷风降温、燃气输送等均以流体为输送介质。在公路和桥梁建设中,路基和边坡的稳定性、桥梁和涵洞的修建也与水密切相关。此外,在土建工程施工中,围堰修建、基坑排水也涉及许多流体力学问题。只有学好流体力学,掌握流体的各种力学特

性和运动规律,才能很好地解决土木工程中遇到的流体力学问题。

因此,流体力学既包含自然科学的基础理论,又涉及工程技术科学方面的应用。此外,如从流体作用力的角度,则可分为流体静力学、流体运动学和流体动力学;从对不同“力学模型”的研究来分,则有理想流体动力学、粘性流体动力学、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。

流体力学和固体力学有着密切的关系。流体力学与弹性力学同属于连续介质力学范畴,都采用连续介质力学的一般方法研究问题,就是基本方程也有一定相似之处,如流体力学中的纳维—斯托克斯方程与弹性力学中的拉梅方程,流体力学中的边界层概念应用到弹性力学板壳问题中得到了边缘效应方程,甚至在一定条件下固体可当做流体处理。如岩土定向爆破、与固体物质的聚能爆炸中,爆震波的传播可当做气体中激波的传播。流变学就是统筹研究流体和固体的形变与流动。

二、流体力学发展简史及展望

1. 流体力学的发展简史

流体力学是在人类同自然界作斗争,在长期的生产实践中,逐步发展起来的。早在几千年前,劳动人民为了生存,修水利,除水害,在治河防洪,农田灌溉,河道航运,水能利用等方面总结了丰富的经验。我国秦代李冰父子根据“深淘滩,低作堰”的工程经验,修建设计的四川都江堰工程具有相当高的科学水平,反映出当时人们对明渠流和堰流的认识已经达到较高水平。隋代修建的京杭大运河工程,全长达 1782km,大大改善了我国南北运输的条件,至今为人称颂。早在秦汉时代我国劳动人民就不断改进水磨、水车和水力鼓风设备,汉代张衡还创造了水力带动的浑天仪,说明水力机械当时已经有了很大的进展。再如我国古代计时所用的铜壶滴漏就是利用孔口出流、水位随时间变化的规律制造的,反映出当时人们已经对孔口出流的原理有了相当的认识。早在几千年前,我国古代就发明了水压唧筒等水力机械,与我国情况类似,古罗马人修建了大规模的供水管道系统,埃及、巴比伦、印度、希腊等国修建了大量的渠道来发展农业和航运事业。以上这些成就大多是对客观世界直观的定性认识,还未上升为理论。流体力学真正成为一门科学并逐渐发展的过程可分为 3 个阶段。

1) 经典流体力学的发展

对流体力学学科的形成第一个做出贡献的是古希腊的阿基米德,他建立了包括物理浮力定律和浮体稳定性在内的液体平衡理论,奠定了流体静力学的基础。此后千余年间,流体力学没有重大发展。直到 15 世纪,意大利达·芬奇的著作才谈到水波、管流、水力机械、鸟的飞翔原理等问题;17 世纪,帕斯卡阐明了静止流体中压力的概念。

流体力学真正作为一门严密的科学,是从 17 世纪开始形成的。首先要归功于牛顿发明了微积分,在他的著作《自然哲学的数学原理》一书中,他还研究了粘性流体的剪应力公式、声速和潮汐理论。在 1738 年,他提出了著名的伯努力定理。1752 年,达朗贝尔提出连续性方程。尤其是欧拉于 1775 年提出了流体运动的描述方法和无粘性流体运动的方程组,推动了无粘性流动。欧拉方程和伯努力方程的建立,是流体动力学作为一个分支学科建立的标志。因此,欧拉是理论流体动力学的奠基人。



19世纪的主要进展是对无粘有旋和粘性流动的初步研究。纳维、斯托克斯分别于1823年、1845年导出了粘性流体运动的基本方程组,这就是著名的N-S方程,并为当时哈根、泊肃叶通过实验得到的圆管内粘性流体的流量公式所验证,这是粘性流体运动理论的发端,是流体动力学的理论基础。

经典流体力学的出现,使人们的认识建立在严密的理论上。但由于认识水平的限制,还无法从理论上解释运动物体所受的阻力(达朗贝尔佯谬),即对于两种最重要的流体——水和空气,其粘性很小,人们很难理解被经典理论所忽略的摩擦力怎么会在如此程度上影响流体的运动。因此,当时的情况是,水力学工程师观察着不能解释的现象,而数学家却解释着观察不到的事物(钱令希等1985,周光炯等1992)。

2) 近代流体力学的发展

从19世纪末开始,人们主要深入细致研究流体粘性运动和高速运动的特性,从而使理论流体力学可以真正用来指导实践,20世纪上半叶航空事业的巨大成功就是极具说服力的证明。在这一时期,流体力学的主要成就如下。

1883年,雷诺的实验发现了流体运动的两种运动形态:层流和紊流。雷诺发现的重要性在于它推动了整整一个世纪的紊流研究。尽管紊流问题还没有解决,但人们对它的认识深化了,并解决了大量实际问题,所以具有划时代的意义。

1904年,普朗特凭他丰富的经验和物理直觉,提出了著名的边界层理论。边界层理论的重大意义在于,在人们还不可能求解完整的N-S方程以前,解决了阻力问题,使人类的飞行至少提前了半个世纪,因而可以说普朗特是近代流体力学的奠基人。

1910年泰勒提出了湍流的涡扩散理论。1923年,他得到了两个同心圆筒间流动失稳的条件,形成所谓的泰勒涡。1935年,泰勒建立了均匀各向同性湍流的理论。在这一时期湍流研究的理论成果使人们加深了对湍流结构和机理的认识,其意义是不可估量的。泰勒科学工作的特点是善于把深刻的物理洞察力和高深的数学方法结合起来,并擅长设计简单而且完善的专门实验来证实他的理论。因此,泰勒在力学界的影响是深远的。

1911年,卡门证明了圆柱尾流内涡街的稳定性,可以用来解释桥梁风振、机翼颤振等现象。1928年起他定居美国以后,在加州理工学院建立古根海姆空气动力学实验室(GALCIT),几乎汇集了世界上最优秀的人才,成为当时世界上空气动力学的研究中心。其中的超前理论研究,为人类的航空航天事业奠定了基础,因而他被誉为航空航天大师。卡门在这一时期的成果集中在气动方面,包括机翼的举力面理论、亚声速流近似理论、跨声速相似理论、超声相似理论、超声速流细长理论。他也像普朗特一样,善于透过现象抓住本质,提炼出合理的数学模型,树立了数学理论和工程实际相结合的典范。

我们还要提到当时的苏联科学家的杰出贡献。比如,谢多夫完善了量纲分析和相似理论,并应用于强爆炸和湍流问题。柯尔莫果洛夫虽是一个伟大的统计数学家,但他总是力图把他的纯粹数学的研究成果同实际应用结合起来,提出了局部各向同性湍流理论,提出了用湍流能量和典型频率的微分方程求解雷诺平均方程的方法。流体力学界于1991年隆重纪念柯尔莫果洛夫的重要文章发表50周年,充分说明他的著作是不朽的。

在这一时期,以周培源为代表的中国流体力学家已跻身于国际的学术舞台,为近代流体力学的发展作出了突出的贡献。1945年,周培源在美国《应用数学季刊》上发表了《关于湍流关联速度和湍流脉动方程的解》,首先提到了相关函数的微分方程,为现代湍流

高阶矩模式理论奠定了基础。以后又提出了湍流的旋涡结构理论。钱学森早在 20 世纪 30 年代就来到了加州从事空气动力学的研究,并同卡门一起提出了近似计算高亚声速流气动力的卡门—钱公式。20 世纪 40 年代提出了跨声速流的相似律。他还开创了高超声速流和稀薄气体动力学新领域。郭永怀同钱学森在研究跨声速流时提出了上下临界马赫数的概念,并发现当飞行速度超过下临界马赫数时,理论上连续解依然可以存在。只有来流速度超过上临界马赫数时,才会出现激波。在以后的 10 年中,郭永怀从事激波边界层相互作用及高超声速流的研究,特别是 1953 年在研究有限长平板边界层二阶理论时,提出了克服奇异性的途径,后被钱学森命名为 PLK 方法。1949 年,林家翘解决了流动稳定性理论中的一个数学疑难,指出稳定性问题中,流体粘性趋于零并不等价于无粘性的情况,并用渐近方法求解了奥尔—索末菲尔德方程,理论上得到的 TS 波后来为低湍流度风洞实验证实。中国科学家的上述成果已载入史册,这是每一个炎黄子孙的光荣。

从以上这段历史可以看到,以普朗特为代表的应用力学学派的风格在近代力学发展中的决定性意义,从哥廷根、剑桥、加州到莫斯科及中国科学家的研究集体都为它的形成作出了贡献,其主要特点是工程科学同数学的紧密结合。由于这一风格的影响,流体力学又回到了生产实践,解决了人类为实现飞行的理想所面临的关键技术问题。同时也推动了流体力学自身的发展,使粘性流动和可压缩流动的理论得到完善,为 20 世纪下半叶现代流体力学的发展奠定了基础。

3) 现代流体力学的发展

所谓现代流体力学指的是,用现代的理论方法、计算和实验技术,研究同现代人类社会生产活动和生存条件紧密相关的流动问题的学科领域。因此,现代流体力学正处在一个用理论分析、数值计算、实验模拟相结合的方法,以非线性问题为重点,各分支学科同时并进的大发展时期。在这一时期的主要成就如下。

(1) 计算流体力学已发展成熟。出现了有限差分、有限元、有限分析、谱方法和辛算法,建立了计算流体力学的完整理论体系。计算流体力学在高速气体动力学和湍流的直接数值模拟中发挥了重大作用。前者主要用于航天飞机的设计,后者要求分辨率高,计算工作量大,如果没有先进的计算机是不可能完成的。目前,超级计算机、工作站的性能有了飞跃,最高速度可达每秒数万亿次,并行度也在提高,因此,人们已经可以用欧拉方程,雷诺平均方程求解整个飞机的流场,以及雷诺数达到 10^5 的典型流动的湍流问题。计算流体力学几乎渗透到流体力学的每个分支领域。

(2) 非线性流动问题取得重大进展。自 20 世纪 60 年代起,对色散波理论进行了系统的研究,发现了孤立子现象,发展了求解非线性发展方程完整的理论和数值方法,并被广泛应用于其他学科领域。现代流体力学也出现了以下一些新兴的学科分支。

① 生物流体力学。主要研究人体的生理流动,包括心血管、呼吸、泌尿、淋巴系统的流动。流体的非牛顿流行为(如血液属卡森流体),管道的分叉和变形,肺与肾脏的多孔性,微循环通过细胞膜的传质,流动的尺度现象(如法罗伊斯—林奎斯特效应)是人体生理流动的特征,这方面的研究为发展生物医学工程(如治疗动脉粥样硬化、人造心瓣等)作出了贡献。此外,还研究了植物体内的生理流动、鱼类的泳动和鸟类的飞行、体育运动力学等。



② 地球和星系流体力学。它是主要研究大气、海洋、地幔运动一般规律的学科分支,包括全球尺度、天气尺度、中尺度的运动。其特点是要考虑旋转和层结效应,深化了人类对自然现象的认识。

③ 磁流体力学和等离子体物理。它主要研究在磁场中的流体运动规律,包括磁流体力学波与稳定性。虽然低温等离子体早已在工业中得到应用,但直到20世纪40年代,才由阿尔芬建立磁流体力学这门学科,并在天体与空间物理中得到应用。20世纪50年代以来,国内外该领域的很多专家主要从事受控热核反应的研究,人们一直在寻求适当的磁场位形与解决磁约束或惯性约束问题的途径。虽然研究的道路是曲折的,但一旦实现点火,前景诱人,人类将不必再为能源枯竭担忧。地球磁场的起源和逆转也是一个磁流体力学的问题。

④ 物理化学流体力学。它是20世纪50年代由列维奇倡导的,研究同扩散、渗析、返混、电泳、聚并、燃烧、流态化和毛细流等物理化学现象有关的流体力学分支。多相流专门研究两相以上同种或异种化学成分物质组成的混合物的流动,如采用单流体模型,有泡沫流和栓塞流;如采用双流体模型,有液固、气固和气液流动;如果在流动中颗粒碰撞占主导地位,隙间流体的作用可以忽略,则可用颗粒流模型。多相流在自然界与在化工、冶炼和石油工业中有广泛的应用。实际上,渗流的出现应以19世纪的达西定律为标志,20世纪50年代以后,进一步发展了非等温、非均匀介质、非牛顿和多相渗流、物理化学渗流、生物渗流等。20世纪20年代建立了流变学,以后逐步形成非牛顿流体力学,包括变粘度、有屈服应力、有时效和粘弹性的流体运动。测定了各种非牛顿流体的本构关系,揭示其与介质内部结构,如高分子链、蜡晶结构、悬浮固体颗粒、纤维、血球的联系,描述非牛顿流体的运动与稳定性,并应用于塑料、化纤、彩胶、橡胶和造纸工业。

2. 流体力学的发展趋势

在展望未来流体力学发展之前,我们来分析一下我国和世界的现状。一方面,我国的研究工作已有一定的基础与积累;另一方面,同国际学术界相比,研究的总体水平还有一定的差距。虽然我国的经济有了飞速的发展,但同世界上发达国家相比,我们还较落后,科研经费的投入还很不足,所以在制订规划时,要考虑我国的国情,要继续跟踪高技术,同时,一定要把重点放在同国计民生紧密相关的问题上。在这里,我们列出一些对未来我国经济和社会发展很重要的,与流体力学有关的科学技术问题。

能源:世界对能源的需求日益增长。我国正处在经济腾飞时期,必须加速与能源有关的工业的发展。我国的能源以煤为主,地理分布不匀。石油、天然气产量虽已有一定规模,但大庆油田已进入后期开采,维持原有产量有一定难度。已探明,西部塔克拉玛干沙漠石油储量不少,但输送是个大问题。我国海上石油有一定储量,近海采油已有一定基础,还要进一步向300m以下的深海进军。我国水力资源丰富,水电、核电很有潜力,在近期要大力开发。在能源开采、输送和利用中有大量流体力学问题,如在发展张力腿式平台(TLP)时,要解决的关键技术问题是由非线性波与结构的相互作用引起的慢漂运动与高频共振。在三次采油中,为有效地采用强化采油技术驱替仍残留在多孔岩体中的多半原油,要避免粘性指进现象,石油、天然气及水煤浆的输送涉及管道中不同流态的多相流驱动问题,水电站的关键技术之一是防止水轮机叶片受空泡和泥沙侵蚀;要采用射流技术来提高燃烧效率等。

环境：人口增长与工业发展是人类面临的严峻的环境问题，已引起世界各国的关注。现代社会人类的生存环境涉及气候、生态、污染、灾害等不同尺度，多学科交缘的问题，如全球变暖、臭氧空洞、酸雨、土地沙漠化、厄尔尼诺、台风、风暴潮、滑坡、泥石流等。可用建立观测站网，采用诸如遥感等各种现代测试手段，并用数值模拟来进行动力学的预测。多数环境问题是因发生在地球表层的流体运动和界面过程引起的，也存在大量流体力学问题。可重点研究陆气、海气界面过程，污染物扩散输运，风沙、泥沙、泥石流运动等问题，因此要研究层结流体中的湍流边界层，在陆地要考虑植被的影响，在海上要考虑不规则波浪、气泡、水滴的作用，远距离污染物的输送涉及干沉积、湿沉积、大气化学、放射性衰变等物理化学过程。为解决泥沙问题，首先要确定不同成分泥沙的本构关系，波流与岸线、泥底的相互作用，才能预测在复杂波流场中的泥沙输运与地貌变化。泥石流要解决分类、起动、运动、沉积、预报和防治问题。研究电磁波在湍流大气中的传播及其与界面的相互作用是为了正确反演遥感信息，取得重要环境数据。为控制环境污染，要研究清洁燃烧技术，流态化与等离子体技术，实现废弃物的无害化处理，并回收能量和物质。

交通：近几年我国高铁发展迅速，但在高速列车车头前会形成压力波，两车相遇和通过隧道时要考虑这个问题。要设计好的气动外形并采用其他措施，减小阻力，并要求有较好的侧向稳定性。节能型小轿车在良好的城市规划条件下，会有一定程度的发展。由于节能与环境的需要，未来的趋向是轻型化，要设计具有低阻负升力美观大方的小轿车，以满足市场的需求。为发展航运事业，要设计高速、安全、“绿色”船舶，研制新型水上、水陆两栖运输工具(如地效翼船)，开辟、疏浚航道，建设深水泊位的集装箱码头，也有许多与船舶工程、海岸与港湾工程有关的流动问题。

生物：生物学对人类的健康，农、林、牧业的革命有密切关系，在 21 世纪，无疑是头等重要的问题。细胞力学旨在了解细胞分裂、粘附、吞噬、运动的机理及应力与生长的关系，这对理解生理病理现象，攻克癌症及心血管疾病等都有重要意义。为了研制生物代用品，如人造胰脏、皮肤、血管、血液等来恢复、维持、改善人体组织的功能，形成了组织工程。生物学家的研究成果要转化为产品或进行生物加工，要依靠生物反应器，要利用力学原理实现高效分离和纯化，以保证正常的新陈代谢，保障细胞不受损伤。因此，流体力学可在生物技术和生物工程中发挥作用，在细胞层次上进行研究是未来生物流体力学的发展趋向(吴望一，1994)。

综上所述，在未来，流体力学仍有着极其广阔的应用前景，对于人类、我国的经济建设和社会可持续发展的各个方面有着不可忽视的作用。根据以上所提出的重要科学技术问题，还可以看出，21 世纪的流体力学是 20 世纪现代流体力学发展的深化和继续，随着计算机的不断更新换代，不但可以解决极其困难复杂的问题，将结果形象逼真地显示出来，而且可以进行优化设计与控制。所以要继续发展大规模科学与工程计算，研究并行算法与可视化技术，使计算流体力学在其中发挥更大的作用。我们要发扬老一辈科学家执着追求真理的艰苦奋斗精神，学习好流体力学这门课程，并进一步发展流体力学这一古老而又崭新的学科领域，为人类进步和我国的现代化建设作出贡献。



三、流体力学的研究方法

流体力学采用实验研究、理论分析与数值计算的方法研究流体的平衡与机械运动规律。在不同的历史时期有不同的研究方法。

流体力学是从不断总结生产经验与实验研究基础上产生和逐渐发展起来的。18世纪中叶以前是流体力学萌芽与发展初期,那时主要运用初等数学解决流体静力学与运动学问题,只涉及少量的流体动力学问题,实验设备与量测手段也比较简单。

18世纪中叶以后开始形成一门独立的流体力学学科,此时开始运用高等数学、采用理论分析法研究流体的平衡与机械运动规律,流体动力学得到了较大的发展。理论分析法一般是在实践与实验的基础上对运动流体提出合理的假设,建立简化的力学模型,再根据物理与一般力学中的原理与定理,建立基本方程。最后利用边界条件及初始条件求数学解析解,并与实验作比较。理论分析法包括有限体积法、微元体积法、速度势法、保角变换法等。在这方面,欧拉与拉格朗日是“理论流体力学”的奠基人。

20世纪60年代后由于计算方法与电子计算机的发展,形成了“计算流体力学”,“计算流体力学”广泛地采用了有限差分法、有限单元法、边界元法与谱方法等数值算法。数值算法能求解许多理论分析法无法完全解决的问题,利用数值模拟还节省了实验研究所需的大量人力、物力、财力和时间。

但是,数值计算无法替代实验研究与理论分析。首先,理论分析与数值计算结果需要获得实验的验证与进一步启迪。近代实验设备与实验手段日趋完善,如采用现代的流动显示设备、风洞与水洞、激光流速仪,用计算机对实验进行数据采集、检测与控制。此外,理论分析法是数值计算的基础,对实验研究也有指导意义。理论分析法在近代也有较大的发展,如流动稳定性理论、非定常流理论、粘性流体的三元流理论、跨音速理论等。

总之,实验研究、理论分析和数值计算这3种方法相互补充、相互促进、相互渗透,为流体力学的不断发展作出了巨大的贡献。

第 1 章

流体的宏观模型和物理属性

教学目标

了解水力学的定义、任务及其在专业中的作用。

理解液体基本性质：易流动与不易压缩性；连续介质与理想流体。

掌握液体的主要物理力学性质；牛顿内摩擦定律。

教学要求

知识要点	能力要求	相关知识
连续介质模型	理解流体连续介质模型的特点	物体分子结构
粘滞性	掌握粘滞性作用过程、粘滞系数与粘滞力间的关系式	分子内能
牛顿流体 非牛顿流体	了解牛顿流体与非牛顿流体的分类	