

普通高等教育“十三五”规划教材

工程流体力学

张明辉 滕桂荣 主 编
陈庆光 郭兰兰 聂志峰 副主编



 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

普通高等教育“十三五”规划教材

工程流体力学

主 编 张明辉 滕桂荣
副主编 陈庆光 郭兰兰 聂志峰
参 编 张永超 刘 冰 李见波 李志敏



机械工业出版社

工程流体力学是力学的一个重要分支,是研究流体(液体和气体)的力学运动规律及其应用的学科,即研究在各种力的作用下,流体本身的静止状态和运动状态,以及流体和固体壁面、流体和流体间的相互作用。本书除了介绍流体力学的基本概念、基本方程、工程应用等传统内容外,在书中还增加了国际发展前沿的流体力学案例、创新实验和科技小制作及运用流体力学理论知识解决实际工程问题等环节。本书以流体力学的理论为基础,以工作任务为驱动,精选教学内容,通过案例导入、综合实例和拓展提高环节,使学生在掌握流体力学的基本概念、原理和理论的基础上,培养学生在流体力学方面解决问题、分析问题的能力和创新意识。

全书共分10个项目,内容包括:绪论、流体及其物理性质、流体静力学、流体运动学、流体动力学基础、黏性流体流动及阻力、孔口出流与有压管流、边界层理论基础、相似原理和量纲分析以及气体动力学基础。

本书可作为普通高等院校本科机械类、能源动力工程、交通运输工程、工程力学等专业的教材,也可作为远程教育、成人教育、高等职业教育的教学用书,还可供从事相关工作的研究生、工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

工程流体力学/张明辉,滕桂荣主编. —北京:机械工业出版社, 2018.8

普通高等教育“十三五”规划教材

ISBN 978-7-111-60373-3

I. ①工… II. ①张… ②滕… 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(2018)第150197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:张金奎 责任编辑:张金奎 李乐 责任校对:张晓蓉

封面设计:马精明 责任印制:孙炜

北京玥实印刷有限公司印刷

2018年8月第1版第1次印刷

184mm×260mm·19印张·468千字

标准书号:ISBN 978-7-111-60373-3

定价:43.00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

服务咨询热线:010-88379833

机工官网:www.cmpbook.com

读者购书热线:010-88379649

机工官博:weibo.com/cmp1952

教育服务网:www.cmpedu.com

封面无防伪标均为盗版

金书网:www.golden-book.com

前 言

随着普通高等院校教学改革不断深入，基于工作过程的课程改革在普通高等院校教学工作中全面开展，相应的课程体系、教学内容都应体现应用型创新人才的培养目标，本书正是在汲取了近几年教学实践成功经验的基础上编写而成的。

工程流体力学课程属于专业基础课，是基础课与专业课之间的桥梁，课程理论性强，基本概念抽象，流动方程复杂，与实际工程联系密切，为此本书以流体力学的理论为基础，以工作任务为驱动，精选教学内容，让学生认清问题的本质，掌握分析问题的方法，学会解决问题的技巧，并能够灵活应对工程实际问题，以构建创新能力培养的课程构架。本书除了介绍流体力学的基本概念、基本方程、工程应用等传统内容外，在书中还增加了国际发展前沿的流体力学案例、创新实验和科技小制作及运用流体力学理论知识解决实际工程问题等环节，为发展学生的科学想象力和创造力提供了更为广阔的空间。

本书内容丰富，共包含 10 个项目，每个项目由“案例导入”“教学目标”“任务”“拓展提高”“思考与练习”五大部分构成，除项目 1 外，其余项目还包含一个“综合实例”模块，充分体现实践性、应用性，让学生真正做到学以致用。每个项目都将“案例导入”作为切入点，提出问题给学生造成悬念，由浅入深、循序渐进地展开主体内容讲述；融合于项目任务中的综合实例，有利于学生理解和巩固知识点，着重知识的迁移和技能的强化，并让学生学会触类旁通、举一反三，提高知识运用能力。项目中的“拓展提高”部分都是反映流体力学研究的成果，为学生深入进行流体力学的研究提供一些有益的参考。“思考与练习”部分在内容的选择和编排上考虑了初学者的需求，侧重普及性和实用性。全书从感性认知、理性定义、理论计算及工程应用多角度阐述了工程流体力学的内涵。

本书由张明辉、滕桂荣任主编，陈庆光、郭兰兰、聂志峰任副主编。项目 1 由陈庆光编写；项目 2 由聂志峰编写；项目 3 由张永超、刘冰、李见波和李志敏编写；项目 4 和项目 5 由滕桂荣编写；项目 6~项目 9 由张明辉编写；项目 10 由郭兰兰编写。张明辉负责全书的统稿工作。书中参考了书后参考文献中的部分内容，在此向文献作者致以诚挚的谢意！

由于编者水平有限，加之编写时间仓促，书中缺点、错误在所难免，望广大读者批评指正。

编 者

目 录

前 言		思考与练习	71
项目 1 绪论	1	项目 4 流体运动学	74
【案例导入】	1	【案例导入】	74
【教学目标】	3	【教学目标】	76
任务 1 流体力学的研究内容与学科性质	3	任务 1 流体运动的描述方法	76
任务 2 流体力学的发展史	5	任务 2 流场的基本概念	80
任务 3 流体力学的研究方法	7	任务 3 连续性方程	86
任务 4 流体力学的研究领域与相关学科	10	任务 4 流体微团运动的分解	89
拓展提高	11	任务 5 势函数和流函数	94
思考与练习	15	综合实例	97
项目 2 流体及其物理性质	17	拓展提高	98
【案例导入】	17	思考与练习	102
【教学目标】	19	项目 5 流体动力学基础	104
任务 1 流体的连续介质理论	19	【案例导入】	104
任务 2 流体的密度和重度	20	【教学目标】	106
任务 3 流体的力学特性	21	任务 1 理想流体运动微分方程	106
任务 4 牛顿流体和非牛顿流体	27	任务 2 黏性流体的运动微分方程	109
任务 5 表面张力	28	任务 3 理想流体的能量方程	112
综合实例	32	任务 4 实际流体的伯努利方程	115
拓展提高	33	任务 5 恒定流的动量方程	125
思考与练习	34	任务 6 恒定流的动量矩方程	130
项目 3 流体静力学	36	综合实例	133
【案例导入】	36	拓展提高	134
【教学目标】	38	思考与练习	137
任务 1 作用在流体上的力	38	项目 6 黏性流体流动及阻力	141
任务 2 流体静压强特性	39	【案例导入】	141
任务 3 流体平衡微分方程	42	【教学目标】	143
任务 4 重力场中静力学基本方程	46	任务 1 流体阻力的分类	143
任务 5 静压强的测量	48	任务 2 层流与湍流的概念	145
任务 6 液体的相对平衡	55	任务 3 均匀流的沿程损失	148
任务 7 液体作用在平面上的总压力	61	任务 4 圆管中的层流流动	150
任务 8 液体作用在曲面上的总压力	64	任务 5 圆管中的湍流流动	153
综合实例	67	任务 6 湍流的沿程阻力损失	160
拓展提高	68	任务 7 流动的局部损失	166

综合实例	174	思考与练习	244
拓展提高	175	项目 9 相似原理和量纲分析	245
思考与练习	176	【案例导入】	245
项目 7 孔口出流与有压管流	178	【教学目标】	248
【案例导入】	178	任务 1 量纲分析	248
【教学目标】	180	任务 2 量纲分析方法	251
任务 1 孔口出流	180	任务 3 相似原理	257
任务 2 管嘴出流	188	任务 4 模型试验	266
任务 3 有压管道恒定流动	191	综合实例	268
任务 4 管网流动计算	201	拓展提高	269
任务 5 有压管道中的水击	206	思考与练习	271
综合实例	211	项目 10 气体动力学基础	273
拓展提高	212	【案例导入】	273
思考与练习	215	【教学目标】	275
项目 8 边界层理论基础	218	任务 1 气体流动的热力学基础	275
【案例导入】	218	任务 2 微弱扰动在空间的传播	276
【教学目标】	220	任务 3 气体一维定常流动的基本方程	280
任务 1 边界层的概念	220	任务 4 气体一维定常流动的参考状态	281
任务 2 边界层厚度	223	任务 5 变截面管流	284
任务 3 平面层流边界层的微分方程	226	任务 6 实际气体在管道中的定常流动	289
任务 4 边界层的动量积分方程	228	综合实例	293
任务 5 平板边界层的计算	231	拓展提高	294
任务 6 边界层分离现象及绕流阻力	239	思考与练习	296
综合实例	241	参考文献	297
拓展提高	242		

流体与人类的生产和生活密切相关。自然界中，从包围着整个地球的大气到江河湖海中的水，都是流体。可以说，人类生活在一个被流体包围着的世界里。流体力学是在人类同自然界的斗争和生产实践中逐渐发展起来的，它专门研究流体在静止和运动时的受力情况与运动规律，研究流体在静止和运动时的压强分布、流速变化、流量大小、能量损失以及与固体壁面之间的相互作用力等问题。随着科学和技术的发展，流体力学已经深入到科学技术的各个领域与国民经济的各个部门。

【案例导入】

塔科马海峡大桥坍塌与卡门涡街

1940年11月7日，刚刚建成通车四个月的塔科马海峡大桥（Tacoma Narrows Bridge）在低风速中由于颤振而坍塌，震惊了世界桥梁界。

位于美国华盛顿州的塔科马海峡大桥，横跨普吉特海湾，自1938年9月开始修建，于1940年7月1日通车（如图1.1所示），当时为美国第三长的悬索桥，一度被称作“工程界的珍珠港”。该桥在建造前，原任金门大桥（金门大桥，世界著名桥梁之一，为钢桁梁悬索桥，位于美国加利福尼亚州旧金山的金门海峡之上，曾保持多项世界纪录达几十年之久。于1933年开始建造，1937年建成通车，长2737m，耗费10万多吨钢材）设计师和顾问工程师的莫伊塞夫（Moisseiff）建议采用2.4m深的浅支持梁，这不但降低了成本，而且也使桥梁构型更为优雅。然而在铺设桥面之后，人们很快发现该桥在风中会像波浪一样摆动，便给它起了一个诨名——舞动的格蒂（Galloping Gertie）。直至通车时，这一问题仍然存在，但多数人依旧坚信该桥具有足够的结构强度。

然而事与愿违，仅仅四个月后的塔科马海峡大桥在19m/s的低速风中出人意料地发生了剧烈扭曲振动，并且振动幅度逐渐加大至惊人的9m，随后桥面倾斜至约45°，使吊杆逐一拉断并诱发桥面钢梁折断，轰然坠落于普吉特海湾之中（如图1.2所示）。这一过程恰巧被一支当时在此进行外景拍摄的电影队记录下来，并在随后流传开来，在科学界和工程界引起了强烈震动。

众多科学家开始对塔科马海峡大桥的坍塌原因进行研究，这其中就包括钱学森先生的导师、著名的空气动力学家冯·卡门（T. von Karman, 1881—1963）。当听说华盛顿州的州长想要尽快按照同样的设计方案重新修建塔科马海峡大桥时，冯·卡门感到政府的这一举措并

不妥当，他凭借科学家特有的敏锐，意识到桥梁设计中极有可能存在缺陷。为了模拟桥在风中的状态，冯·卡门找来一个塔科马海峡大桥的模型，他将模型放于书桌上，并用电风扇吹风。他很快便发现，当振动频率达到模型的固有频率时，模型将会发生剧烈的共振。他由此得出结论：正是卡门涡街（卡门涡街，流体力学中的重要现象，指在一定条件下，流体绕过某些物体时，会产生两排非对称的旋涡，它们相互交错排列，各个旋涡和对面两个旋涡的中间点对齐，如图 1.3 所示。例如，水流过桥墩、风吹过烟囱都会产生卡门涡街）导致了桥梁发生共振，从而引发了坍塌事故。后来卡门与助手一道，在风洞（风洞是一种空气动力学中用来产生气流的设备，试验时将模型或实物置于风洞中，利用人造气流，测定并研究空气在物体周围流动时所产生的作用）中对塔科马海峡大桥模型进行了进一步的试验分析，再次证明了他之前的推论。正如冯·卡门 1954 年在《空气动力学的发展》一书中写道：塔科马海峡大桥的毁坏，是由周期性脱落的旋涡产生的共振引起的。卡门涡街交替脱落时会产生振动，并发出声响效应，这种声响是由于卡门涡街周期性脱落时引起的流体中的压强脉动所造成的声波，如我们平时所听到的风吹电线的风鸣声就是涡街脱落引起的。



图 1.1 塔科马海峡大桥通车当日的情形

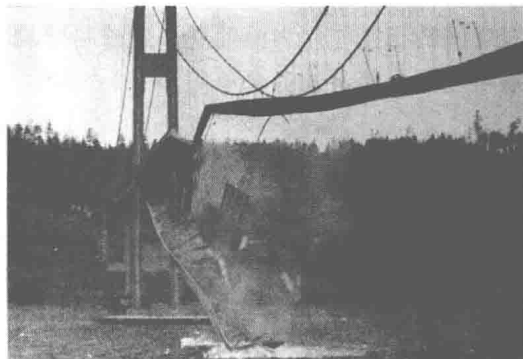


图 1.2 塔科马海峡大桥轰然坠入普吉特海湾瞬间

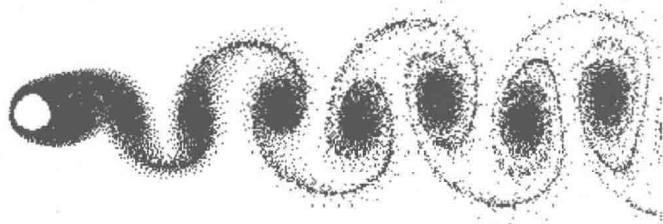


图 1.3 卡门涡街示意图

在获得了足够的证据后，冯·卡门迅速给州长发送了一份电报，其中写道：如果按照原先的设计重新建造，那么新桥也会像之前一样坍塌。不久，州长将冯·卡门和桥梁设计师们召集起来，准备对塔科马海峡大桥的倒塌事件进行详细论证考察。一番唇枪舌剑之后，冯·卡门最终说服了对空气动力学所知甚少的桥梁设计师们。

自此以后，为了避免空气颤振对桥梁的危害，卡门涡街成了桥梁设计中必须考虑的关键问题之一，而对桥梁模型的风洞测试也成了桥梁试验中必备的重要一环。随着更多科学家加入对塔科马海峡大桥的研究，桥梁结构学与空气动力学得到了极大的发展，一门新的学

科——桥梁风工程学也很快应运而生。谁也不曾想到，一次惨重的工程事故，竟推动了一门新学科的诞生！如今在世界上很多关于桥梁、结构或物理课程的课堂上，教师们仍会常常提到这一案例。

【教学目标】

1. 了解流体的定义及流体力学的研究内容与学科性质；
2. 了解流体力学的发展史；
3. 明确流体力学的研究方法；
4. 了解流体力学的研究领域与相关学科。

任务1 流体力学的研究内容与学科性质

自然界中的物质通常以三种状态存在：固体、液体和气体。这三种状态下物质分子之间的结构是不同的。反映在宏观上，固体能保持其固定的形状和体积；液体有固定的体积但无固定的形状；气体则无固定的形状和体积。由于液体和气体都具有无固定形状、能够流动的共同特点，所以通常统称为流体。流体与固体的主要区别在于变形方面。在外力作用下，固体虽然会发生微小的变形，但只要不超出弹性极限，在去除外力以后，固体的变形可以消失而恢复原状。而流体在静止状态下，只能承受压力，不能承受剪切力。而且不论所受的剪切力多么小，只要作用的时间足够长，原先处于静止状态的流体都将会发生连续不断的变形并流动，直到所受的剪切力消失为止。流体一般也不能承受拉力。流体的这种特性就是其易流动性。从这个意义上说，只要具有易流动性的物质都可以定义为流体。因此，除了液体和气体为流体外，等离子体、熔化的金属等也属于流体。

流体和固体所具有的上述不同特性，是因为其内部的分子结构和分子之间的作用力不同而造成的。一般来说，流体的分子间距比固体的分子间距大得多，流体分子之间的作用力相对于固体要小得多，流体的分子运动比固体剧烈，因此流体就具有易流动性，也不能保持一定的形状。液体与气体的差别是气体比液体更容易被压缩，而且气体也不能形成自由表面。表1.1列出了流体与固体、液体与气体之间的不同。

表 1.1 流体与固体的不同

	固体	流体	
		液体	气体
有无固定的形状	有	无	无
有无固定的体积	有	有	无
能否形成自由表面	能	能	否
能否承受一定的拉力	能	否	否
能否承受一定的剪切力	能	否(静止时)	否(静止时)
能否承受一定的压力	能	能	能但易于被压缩

1. 流体力学的研究内容

流体力学是研究流体的平衡与宏观机械运动规律以及流体与周围物体之间相互作用的一

门学科，它是力学的一个重要分支。流体力学研究的对象是流体（包括液体和气体）。在人们的生活和生产活动中随时随地都会遇到流体，大气和水是最常见的两种流体。

流体力学基础理论一般可分为流体静力学、流体运动学和流体动力学三部分。流体静力学主要研究流体处于静止或相对平衡状态下，作用在流体上的各种力之间的关系，即液体平衡的规律；流体运动学主要从几何的观点研究流体运动所遵循的规律，而不考虑流体受力和能量损失；流体动力学主要研究在流体运动时产生和施加在流体上的力与流体速度和加速度之间的关系。

流体力学在工程技术中有着广泛的应用。例如，在电力工业中的火电站、核电站、水电站等，工作介质为流体，而作为带动发电机发电的汽轮机、水轮机、燃气轮机以及输送流体的泵与风机均属于流体机械，这些流体机械的设计必须服从流体流动的规律；在机械行业中润滑、冷却、液压传动、气力输送以及液压和气动控制问题的解决都必须依靠流体力学的理论；在造船工业、航空工业、冶金工业、煤炭工业、石油工业以及土木建筑中的给水排水、采暖通风等工业部门中也都有大量的流体力学问题；海洋中的波浪、环流、潮汐，大气中的气旋、季风、龙卷风，乃至地球深处熔浆的流动也都是流体力学问题。此外，血液也是一种特殊的流体，血液在血管中的流动，心肺肾等脏器中生理流体的运动规律，人工心脏、呼吸机的设计都要利用流体力学的基本原理。由此可见，流体力学是一门非常重要的学科。

2. 流体力学的分类

按照研究方法的不同，流体力学又可分为理论流体力学、实验流体力学和计算流体力学三种。理论流体力学主要采用严密的数学推理方法，力求准确性和严密性，寻求流体运动的普遍解；实验流体力学将实际流动问题概括为相似的实验模型，在实验中观察现象、测量数据并进而按照一定的方法推测实际结果；计算流体力学是随着计算机的发展而发展起来的一种方法，其基本原理是利用各种数值方法编制计算机程序近似求解流体流动的控制方程组，获得各空间和时间离散点处的数值解，从而揭示流场结构及其形成机理等规律。

综上所述，流体力学是一门基础性很强的和应用性很广的学科。在许多实际的工程领域里，流体力学一直起着非常重要的作用。通常，人们又把侧重于工程应用的流体力学称为**工程流体力学**。从学科的角度来看，**工程流体力学**是介乎基础科学和工程技术之间的一门技术学科。一方面根据基础科学中的普遍规律，结合流体的特点建立理论基础，同时又紧密联系工程实践，发展学科内容。**工程流体力学**的基本任务在于建立描述流体运动的基本方程，确定流体流经各种通道（内流问题）及绕流不同形状的物体（边界层问题）时速度、压强的分布规律，探求能量转换及各种损失的计算方法，并解决流体与约束其运动的固体壁之间的相互作用问题。

由于在各种热能动力设备和流体机械设备中采用水、空气、蒸汽、油、烟气等流体作为工作介质，因此，只有掌握了流体基本的运动规律，才能真正了解这些设备的性能和运行规律，进而更好地设计和使用这些设备。所以，**工程流体力学**是机械工程、过程装备与控制工程、热能与动力工程、材料成型与控制工程、航空航天工程、土木工程、水利工程、采矿工程等专业本科学士生一门重要的专业技术基础课，它为这些专业后续专业课程的学习打下必要的理论和技术基础。

任务2 流体力学的发展史

1. 流体力学萌芽阶段

和许多其他学科一样，流体力学来自于生产实践，其发展经历了漫长的岁月。流体力学的研究可以追溯到很远。远古时代，箭弩的发明反映了原始人对箭头的流线型降低摩擦及尾翅的稳定性的探索。在我国，墨家经典《墨子》中就有关于浮力规律的探讨，其他如：北魏贾思勰的《齐民要术》《淮南子》，以及后来的《太平寰宇记》《考工记》等都有关于流体力学问题的记载。曹冲称象、怀丙捞铁牛等都是利用流体力学知识的脍炙人口的故事。

人类最初对流体的认识是从供水、灌溉、航行等方面开始的，所以古代的流体力学同人类的生产活动有着密切的关系。远在几千年前，人们在同自然界的长期斗争中，已经开始建造水利工程和最简单的水利机械。例如，4000多年前的大禹治水、疏通江河，说明我国古代已有大规模的治河工程；在我国公元前256年的秦朝，李冰父子带领劳动人民修建的都江堰水利工程（如图1.4所示），历经2000多年至今仍可用于防洪和灌溉；隋朝时开凿的贯通中国南北，北起涿郡（北京）南至余杭（杭州）的大运河，对构造南北交通发挥了巨大作用；北宋（960—1126）时期，在京杭大运河上修建的真州船闸与14世纪末荷兰的同类船闸相比，约早300多年。此外，我国古代劳动人民还利用定水头下孔口出流的原理发明了刻漏和铜壶滴漏，随后又发明了水磨、水碾等。大约与此同时，古罗马人建成了大规模的供水管道系统等。由于没有相应的数学和机械知识，那时关于流体的认识，只是对客观世界直接的定性认识和一些从实践中总结出来的经验性的东西，尚未上升为理论。然而，正是这些经验的积累，为流体力学的发展奠定了基础。

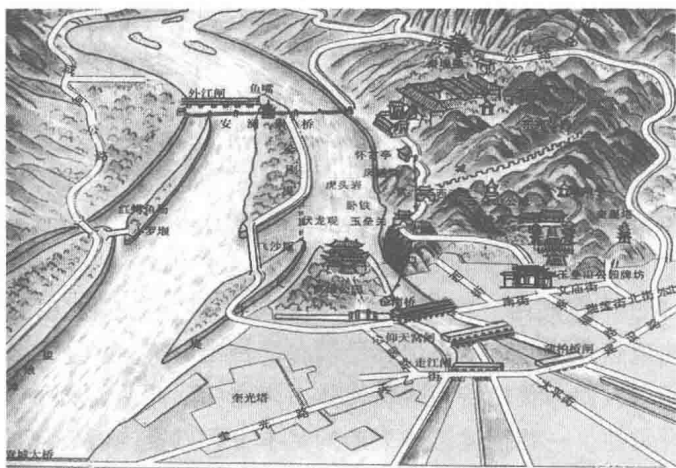


图 1.4 都江堰水利工程示意图

2. 流体力学基础阶段

把流体力学真正当作一门科学来研究则是在西方。流体力学的最早文献中记载着阿基米德（Archimedes），他是古希腊的数学家和发明家，在公元前250年就发表了著作《论浮体》，精确地给出了“阿基米德定律”，从而奠定了物体平衡和沉浮的理论基础。文献中还记载着罗马人在公元前4世纪至1世纪修筑的复杂的水利系统。但在其后的1000多年中，

即在漫长的中世纪，流体力学研究几乎没有新的进展。

直到 15 世纪初，伴随着欧洲的文艺复兴，流体力学研究才又一次繁荣兴起。达·芬奇 (Da Vinci, 1452—1519) 研究了水波、管流、水力机械、鸟的飞翔原理等问题，并设计建造了一座小型水渠；伽利略 (Galileo, 1564—1642) 在流体静力学中应用虚位移原理，提出运动物体的阻力随着流体介质密度和速度的增加而增大；帕斯卡 (Pascal, 1623—1662) 提出了密闭流体能传递压强的帕斯卡原理。

到了 18 世纪，由于欧洲资本主义蓬勃兴起，自然科学的发展突飞猛进，流体力学也有了长足进步。流体力学最基本、最主要的理论都是在这一时期建立起来的，并涌现出一批杰出人物，他们为流体力学的发展做出了巨大贡献。牛顿 (Newton, 1642—1727) 研究了流体中运动物体所受到的阻力，建立了牛顿内摩擦定律，为黏性流体力学奠定了理论基础；伯努利 (Bernoulli, 1700—1782) 从能量守恒出发，建立了反映流体位势能、压强势能和动能之间能量转换关系的伯努利方程；欧拉 (Euler, 1707—1783) 提出了流体的连续介质模型，建立了用微分方程组描述无黏流体运动的欧拉方程；拉格朗日 (Lagrange, 1736—1813) 论证了速度势的存在，并提出了流函数的概念，为分析流体的平面无旋流动开辟了道路；亥姆霍兹 (Helmholtz, 1821—1894) 提出了表征旋涡基本性质的旋涡定理等。上述研究是从理论上或数学上研究理想的、无摩擦的流体运动，采用将流体及其受力条件理想化的方法，忽略次要因素，建立描写流体运动的方程，称为流体动力学 (fluid dynamics)。

19 世纪，工程师们迫切需要解决带有黏性影响的工程问题。纳维 (Navier, 1785—1836) 和斯托克斯 (Stokes, 1819—1903) 提出了著名的描述黏性流体基本运动的纳维-斯托克斯方程 (简称 N-S 方程)，为流体动力学的发展奠定了基础。然而 N-S 方程在数学上解析求解困难，不能满意地解决工程问题，于是人们采取实验先行的办法，对理论不足的部分通过反复实验，总结规律，得到经验公式或半经验公式用于实践，形成了以实验方法来获取经验公式的水力学 (hydraulics)。弗劳德 (Froude, 1810—1879) 提出了船模试验的相似准则数—— Fr 数，建立了现代船模试验技术的基础；雷诺 (Reynolds, 1842—1912) 用实验证实了黏性流体的两种流动状态——层流与湍流的客观存在，并找到了实验研究黏性流体流动规律的相似准则数—— Re 数，以及判断层流与湍流的临界雷诺数，为流动阻力和损失的研究奠定了基础。在流体动力学和水力学空前发展的条件下，人们试图将二者结合起来解决实际问题。1904 年，普朗特 (Prandtl, 1875—1953) 提出了流体边界层的概念，即在流体接近固体边界的一薄层 (边界层) 内，摩擦力起主要作用；而在边界层以外，流体运动则可以近似地看作无摩擦的理想流体的运动。边界层概念的提出为形成理论与实践并重的现代流体力学奠定了基础。所以人们称普朗特为现代流体力学之父。此后，流体动力学和水力学进一步发展，因而更具科学性。一些描述流体运动的基本方程以及当时验证的一些实验结果至今仍在使用。1933 年尼古拉兹 (Nikuradse, 1894—1979) 公布了他以不同粒径的砂粒制成的人工粗糙管内水流阻力系数的实测结果——尼古拉兹实验曲线；科尔布鲁克 (Colebrooke) 1939 年提出了过渡区阻力系数计算的经验公式；1944 年穆迪 (Moody) 绘制出了实用管道的阻力系数图——穆迪图。至此，有压管流的水力计算已渐趋成熟。

3. 流体力学飞跃发展阶段

20 世纪初，飞机的出现极大地促进了空气动力学的发展。库塔 (Kutta, 1867—1944) 和儒科夫斯基 (Joukowski, 1847—1921) 找到了翼型升力和绕翼型环流之间的关系，为近

代高效能飞机设计奠定了基础；冯·卡门发现了卡门涡街，并在湍流边界层理论、超声速空气动力学、火箭及喷气技术等方面做出了巨大的贡献。同时，以普朗特等为代表的一批科学家，建立了以无黏性流体为基础的机翼理论，阐明了机翼受到升力，所以空气能把很重的飞机托举到天空。机翼理论的正确性，使无黏性流体的理论被人们重新认识，它在工程设计中的指导作用也得到了肯定。空气动力学为流体力学在20世纪迅速发展开辟了新的道路。机翼理论和边界层理论的建立是流体力学发展史上的一次重大飞跃。20世纪40年代以后，由于喷气推进和火箭技术的应用，飞行器速度超过声速，实现了航天飞行；关于炸药或天然气等介质中发生爆炸形成的爆炸波理论，为研究原子弹、炸药等起爆后，激波在空气或水中的传播奠定了基础。从20世纪50年代起，电子计算机不断完善，计算技术被引入流体力学领域，使以前因计算过于繁杂而影响进一步探讨的流体力学问题逐步得以解决，计算流体动力学（Computational Fluid Dynamics, CFD）在今天已成为研究流体力学的重要方法。同时，流体力学与其他学科相互渗透，形成了许多交叉学科，例如：生物流体力学、地球流体力学、化学流体力学、液压流体力学、电磁流体力学、高温气体动力学、两相流体力学、流变学等。这些新型学科的出现和发展，为流体力学这一古老学科赋予了新的生机和活力。

纵观流体力学的发展历史，可以看出：

1) 生产和生活的需要是产生和发展科学技术的原动力、没有水利、航运、航空、化工、石油、能源等方面的需要，就没有现在的流体力学。

2) 在流体力学的发展过程中，实验（和工程技术中的实践）是最先使用的一种方法，流体力学中的一切重要现象和原理，几乎都是通过它发现的，它对流体力学的发展具有特别重要的意义。

3) 流体力学的研究内容也遵循从简单到复杂，从具体到抽象和从特殊到一般的原则，从单相无黏性流体的定常运动发展到多相非牛顿流体的湍流运动，从单纯的力学发展为复杂的交叉学科，从单纯的动量传递发展为动量、热量、质量同时传递。

4) 流体力学虽已取得巨大进展，但一些重要的基本问题如湍流、涡旋运动、流动稳定性、非定常流动与非线性水波等仍未得到圆满解决。众多的流体力学新分支或交叉学科均尚处于发展的初期，这些工作均有待于流体力学工作者的进一步努力。

5) 13世纪以前，我国在流体力学原理的应用方面做出过巨大贡献，曾经领先于世界。近代也出现了像钱学森、周培源、郭永怀、吴仲华等国际知名的流体力学家。20世纪40年代以后，在理论上也做出过不少成绩，不仅建造了众多的实验设备，解决了大量的生产实际问题，而且还培养了一支具有较高水平的理论和实验队伍，为今后进一步发展我国的流体力学事业奠定了坚实的基础。

任务3 流体力学的研究方法

从流体力学的发展史可以看出，流体力学是在不断总结生产实践与实验研究的基础上产生并逐步发展起来的，在不同的历史时期，有着不同的研究方法。

18世纪中叶以前是流体力学的发展初期，主要运用初等数学来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，采用的实验与测量方法也比较简单。18世纪中叶以后，开始形成独立的流体力学学科，并运用高等数学，采用理论分析的方法来研究流体的

平衡与机械运动规律，流体动力学得到了较大的发展。在这方面，欧拉和拉格朗日是“理论流体力学”的奠基人。20世纪60年代以后，计算技术和计算方法的飞速发展，使得基于数值计算方法的计算流体力学得以用于实际的研究中。

如今，实验观测、理论分析和数值计算以及三者的有机结合已成为包括流体力学在内的现代自然科学研究的基本手段和方法。

1. 实验观测

实验观测包括现场观测和实验室模拟观测。

现场观测是指对自然界固有的流动现象或已有工程的全尺寸流动现象，利用各种仪器进行系统观察，从而总结出流体运动的规律并借以预测流动现象的演变。过去对天气的观测和预报，基本上就是这样进行的。但现场流动现象的发生不能控制，发生条件几乎不可能完全重复出现，从而影响到对流动现象和规律的研究；现场观测还要花费大量物力、财力和人力。因此，人们建立实验室，使这些现象能在可以控制的条件下出现，以便于观察和研究。

实验室模拟观测是指在实验室内，流动现象可以在短得多的时间内和小得多的空间中多次重复出现，可以对多种参量进行隔离并系统地改变实验参量。在实验室内，人们也可以造成自然界很少遇到的特殊情况（如高温、高压等），可以使一般情况下无法看到的现象显示出来。

现场观测常常是对已有事物、已有工程的观测，而实验室模拟却可以对还没有出现的事物、没有发生的现象（如待设计的工程、机械等）进行观察，使之得到改进。因此，实验室模拟观测是研究流体力学的重要方法。但是，要使实验数据与现场观测结果相符合，必须使流动相似条件完全得到满足。不过对缩尺模型来说，某些相似准则数（如：雷诺数 Re 和弗劳德数 Fr 等）不易同时满足，某些工程问题的大雷诺数也难以达到。所以在实验室中，通常是针对具体问题，尽量满足某些主要相似条件和参数，然后通过现场观测验证或校正实验结果。

实验观测研究的一般过程是：在相似理论的指导下建立模拟实验系统，用流体测量技术测量流动参数，处理和分析实验数据。实验结果能反映工程中的实际流动规律，发现新现象，检验理论结果等，但结果的普适性较差。

如图 1.5 所示，典型的流体力学实验有风洞实验、水洞实验、水池实验等类型。

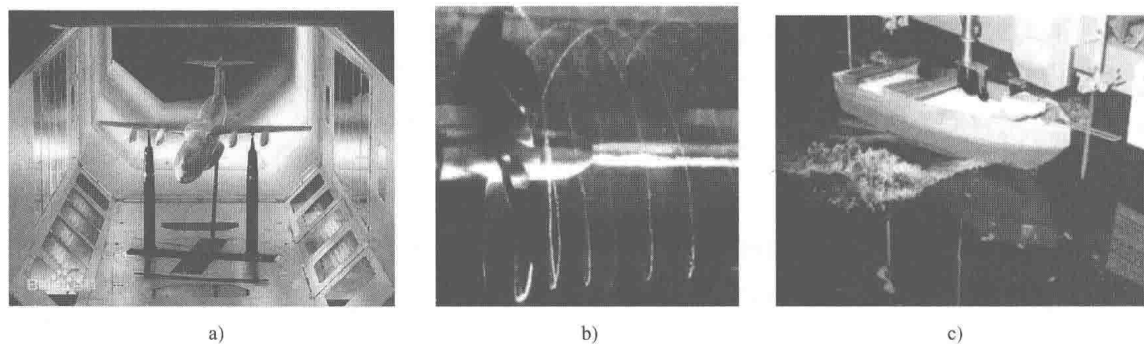


图 1.5 流体力学实验类型

a) 风洞实验 b) 水洞实验 c) 水池实验

现代流动测量技术在计算机、光学和图像技术配合下, 在提高空间分辨率和实时测量方面已取得长足进步。常用的流场测量与显示技术有: 热线热膜风速仪 (HWFA); 激光多普勒测速仪 (LDV)、全场多普勒测速仪 (DGV)、粒子图像测速仪 (PIV); 高速摄影 (high-speed photography); 全息照相 (holography); 瑞利散射技术 (FRS); 激光诱导荧光 (PLIF); 阴影法 (Shadow Size); 流速、压强、密度常规仪器测量等。

2. 理论分析

理论分析是指根据流体运动的普遍规律如质量守恒、动量守恒、能量守恒等, 利用数学分析的手段, 研究流体的运动, 解释已知的现象, 预测可能发生的结果。

理论分析方法的一般过程大致如下。

(1) 建立力学模型

一般做法是, 针对实际流体的力学问题, 分析其中的各种矛盾并抓住主要方面, 对问题进行简化从而建立反映问题本质的“力学模型”。流体力学中最常用的基本模型有: 连续介质假设、牛顿流体、不可压缩流体、理想流体、平面流动等。

(2) 建立数学模型

针对流体运动的特点, 用数学方法将质量守恒、动量守恒、能量守恒定律表达出来, 从而得到连续性方程、动量方程和能量方程。此外, 根据具体情况有时还需要补充建立某些流动参量之间的关系式 (如状态方程), 或者其他方程 (如湍流模型)。这些方程统称为流体力学的基本方程组。流体运动在时间和空间上常有一定的限制, 因此, 应给出初始条件和边界条件。整个流动问题的数学模型就是建立起封闭的、流动参量必须满足的流动控制方程组, 并给出恰当的初始条件和边界条件。

(3) 求解方程组

在给定的初始条件和边界条件下, 利用数学方法, 求方程组的解。由于这些方程组是非线性的偏微分方程组, 难以求得解析解, 必须加以简化, 这也是建立力学模型的原因之一。力学家经过多年努力, 探索出许多数学方法或技巧来解这些方程组 (主要是简化了的方程组), 得到一些解析解。

(4) 分析计算结果

求出方程组的解以后, 结合具体流动, 解释这些解的物理含义和流动机理。通常还要将这些理论求解结果同实验结果进行比较, 以确定所得解的准确程度和力学模型的适用范围。

3. 数值计算

1946年第一台电子计算机问世后, 数值计算技术得到了飞速的发展, 有限差分法 (Finite Difference Method, FDM)、有限元法 (Finite Element Method, FEM)、有限体积法 (Finite Volume Method, FVM)、边界元法 (Boundary Element Method, BEM)、谱分析法 (Spectral Analysis Method, SAM)、格子-Boltzmann方法 (Lattice-Boltzmann Method, LBM) 等计算方法相继派生出来, 并且在求解各种流体力学的问题中得到了广泛的应用, 流体力学中的数值计算已成为继理论分析和实验研究之后的第三种重要的研究方法, 是目前对于各种复杂的流体流动问题求解压力场、速度场的主要工具。而且可以预见, 随着计算机计算速度和容量的提高, 以及计算方法的不断进步, 数值计算在复杂流体力学的求解中将发挥越来越重要的作用。

数值计算就是把采用简化模型后的方程组或封闭的流体力学基本方程组, 通过计算机数

值计算的方法来求解。利用数值计算方法进行流体力学问题研究的一般过程是：对流体力学的数学方程做简化和数值离散化，编制程序做数值计算，将计算结果与实验结果进行比较。

电子计算机的出现和发展，使许多原来无法用理论分析求解的复杂流体力学问题有了求得数值解的可能性。数值计算可以部分或完全地代替某些实验，从而节省实验费用。尤其是近年来数值模拟计算方法发展很快，其重要性也与日俱增。

必须说明的是，虽然数值计算方法可用来计算理论分析方法无法求解的数学方程，通常比实验方法节省时间和费用，但它毕竟是一种近似解方法，其适用范围受到数学模型的正确性和计算机性能的限制。

解决流体力学问题时，现场观测、实验室模拟、理论分析和数值计算这几方面是相辅相成的。实验需要理论指导，才能从分散的、表面上缺乏联系的现象和实验数据中分析总结出规律性的结论。反之，理论分析和数值计算也要依靠现场观测和实验室模拟给出物理图案或实测数据，以建立流动的力学和数学模型；最后，还须依靠实验来检验这些模型的完善程度。此外，实际流动往往非常复杂（例如湍流），理论分析和数值计算在数学和计算方面都会遇到巨大的困难，有时甚至得不到具体结果，只能通过现场观测和实验室模拟进行研究。

总之，流体力学的上述三种研究方法各有利弊，不能相互取代，而是需要取长补短、有机结合才能推进流体力学的发展。表 1.2 对三种研究方法各自的优势和局限性进行了比较。随着计算机技术和现代测量技术（如激光、同位素和电子仪器等）的不断发展及其在流体力学研究中的应用，流体力学必将取得更大的发展，并在工程和生产实际中发挥更大的作用。

表 1.2 三种研究方法比较

研究方法	优势	局限性
理论分析	对流动机理解析表达,因果关系清晰	受基本假设局限,少数情况下才有解析结果
实验研究 (模型试验)	直接测量流动参数,找到经验性规律	成本高,对量测技术要求高,不易改变工况,存在比尺效应
数值模拟	扩大理论求解范围,成本低,易于改变工况,不受比例尺限制	受理论模型和数值模型局限,存在计算误差

任务 4 流体力学的研究领域与相关学科

从流体力学的发展过程可以看出，它的产生和发展，始终是与社会生产实践紧密地联系在一起。只要工程中涉及流体的运动及流体和固体的相互作用，就要以流体力学为基础来进行分析和研究。流体力学既是一门重要的应用技术学科，又具有很强的基础学科性质。许多近代科学的重大成就都源于流体力学的研究。国家自然科学基金委员会《自然科学学科发展战略调研报告》中指出：“由流体力学中发现的规律，逐渐渗透到其他科学领域并最终形成具有普遍意义的理论的科学发 展道路，今后仍将在整个自然科学的发展中继续起着重要作用”。

随着科学和技术的发展，流体力学已经深入到各个科技领域与生产部门。目前，甚至已经很难找出一个技术领域与流体力学没有任何的联系。因此，流体力学与我国科学技术的发

展和现代化建设都有着密切的联系,例如,研究大气和海洋运动可以做好天气与海情预报,以便为农业、渔业、航空、航海、国防和人民生活服务;研究各种空间飞行物体如飞机、人造卫星、导弹、炮弹和各种水上或水下运动物体如舰艇、潜艇、鱼雷等的运动,可以了解它们的空气和水动力性能,以便获得阻力小、稳定性高的最佳物体外形;研究河流渠道和各种管路系统内的流动,可以掌握其运动规律,特别是流体与各种界壁之间的作用力,以便获得耗能少、安全性高的工程设计;研究核反应堆,动力设备中的冷却系统、热交换器、水暖系统以及各种化工设备中的流动,不仅可以了解它们的运动规律,而且可以掌握它们在壁面处的传热传质规律等。此外,油气田的开发,地下水的利用,以及机械的润滑等均与流体力学密切相关。特别是近数十年来,流体力学与相邻学科相结合,发展了许多新的交叉分支学科,极大地充实了流体力学的研究内容和扩大了其应用领域。

进入20世纪50年代后期,人类飞行与进入太空的愿望均已基本实现,流体力学的研究内容,有了明显的转变,除了对一些较难、较复杂的问题,如湍流、流动稳定性与转换、涡旋动力学和非定常流继续研究外,更主要的是转而研究石油、化工、能源、环保等领域中的流体力学问题,并与有关邻近学科相互渗透,形成许多新分支或交叉学科,如计算流体力学、实验流体力学、可压缩气动力学、稀薄气体动力学、磁流体力学、天体物理流体力学、非牛顿流体力学、生物流体力学、多相流体力学、环境流体力学、物理-化学流体力学、量子流体力学、渗流力学和流体机械力学等。一般来说,这些新的分支或交叉学科所研究的现象或问题都比较复杂,在流动工程中不仅有能量传递,很多时候还有热量传递和质量传递,甚至还伴随有物理或化学反应。而且所研究的流体本身也不简单是单相或牛顿的,很多时候是多相或非牛顿的。面对这些众多而又复杂的新问题,要想很好地解决它们,实际上是对流体力学工作者的一次大挑战。因为现有的流体力学运动方程组并不能完全准确地描述这些新现象和新问题,试图用现有的运动方程组和单纯计算的方法去解决这些问题也是相当困难的。唯一可行的道路是采用纯实验的方法或实验与计算相结合的方法。在后一种方法中,即先用实验方法获得一些有用的经验数据,然后与计算方法相结合进行半经验的数值计算,并将所得结果与纯实验结果进行比较。近年来在一些新分支或交叉学科(如多相流、生物流体等)中采用这种方法,获得了较好的效果,大大推动了新分支或交叉学科实验技术的发展。

拓展提高

在日常生活或工程应用中,有一些流体力学现象或设计与人们的直观感觉是不相符的,但这些看似不合理的现象或设计恰恰反映了流体的某种运动规律。下面举几个这方面的例子:

1. 超声速流的加速

人们一般都认为流体在面积逐渐变小的通道中流动时,其流动将逐渐加速。如消防龙头和灌溉用的喷头就是面积逐渐变小的通道。不过这种情况一般发生在中速的水流流动或低速、亚声速的气体流动中。气体在超声速流动时,只有在面积逐渐变大的通道中,流动才获得加速,这与人们的直观感觉是不相符的。

对于亚声速变截面流动,截面积增加时,流速减小,压强增加,变化规律符合不可压缩流体的流动规律。亚声速气流做加速降压流动时,过流断面积一定是逐渐减小的。欲使气流