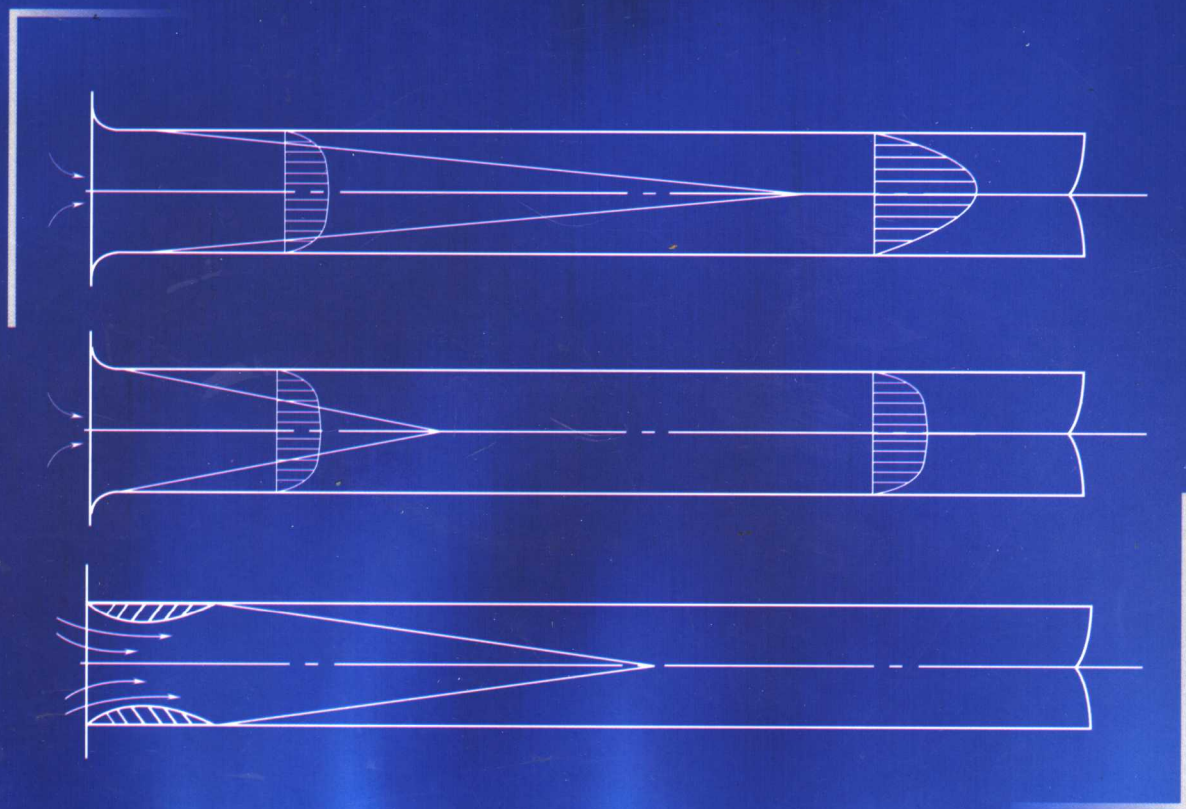


实验流体力学

SHI YAN LIU TI LI XUE

朱仁庆 杨松林 杨大明 编著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

实验流体力学

朱仁庆 杨松林 杨大明 编著

国防工业出版社

·北京·

内 容 简 介

全书的内容包括:实验流体力学及其简史、研究内容、研究方法和实验流体力学的任务及面临的问题;相似理论、水电比拟、数值模拟和误差分析与数据处理;流体力学实验设备和流体力学测试仪器介绍;绕物体的不可压缩流动概述、势流理论中圆柱绕流和机翼绕流及其二元机翼表面压力分布的测定;边界层问题;动量及动量矩定理的验证及其在实验中的应用;波浪现象、波浪理论概述、实验室中的波浪模拟和船模在波浪中运动实验;管流基本理论和管道及管嘴内流动实验;可压缩流动的基本方程和喷管内的可压缩流。

本书可作为船舶与海洋工程、土木工程、港口航道与海岸工程、轮机工程和机械工程等工科专业本科生和研究生的教材、相关领域教师的教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

实验流体力学/朱仁庆等编著. —北京:国防工业出版社,2005.8

ISBN 7-118-03842-3

I. 实... II. 朱... III. 流体力学—实验
IV. 035—33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 016450 号

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号)

(邮政编码 100044)

天利华印刷装订有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 13½ 310 千字

2005 年 8 月第 1 版 2005 年 8 月北京第 1 次印刷

印数:1—4000 册 定价:20.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422

发行邮购:(010)68414474

发行传真:(010)68411535

发行业务:(010)68472764

前 言

实验流体力学是与理论流体力学、计算流体力学并列的流体力学三大顶级层次分支之一。它的研究和发展贯穿着流体力学的各个研究领域。在流体力学及其应用的研究与发展的全部历史中,实验流体力学研究起到了关键性的作用,有时甚至是决定性的作用。例如它用精细的观察和测量手段揭示了流动过程中在流场各处的流态或流动特征,通过流动参量的直接测量提供了各种特定流动的物理模型,以相似理论、水电比拟、计算机模拟和误差分析与数据处理作为其理论基础。目前国内实验流体力学的书很少,而且系统性和实用性也不尽人意,也没有适合于船舶与海洋工程、土木工程、港口航道与海岸工程、轮机工程和机械工程等工科专业的本科生、研究生和教师的教材版本。对于上述专业的大学生(本科生和研究生),实验流体力学及其实验有利于培养其以动手能力为主的综合创新能力,同时也为上述专业的研究者从事以实验为手段的研究工作提供系统理论支撑。

全书共分10章,朱仁庆编写了第6章动量及动量矩定理、第7章边界层、第9章管道流动和第10章可压缩流体流动,并且完成了全书的统稿工作;杨松林编写了第1章绪论、第2章基本理论及其方法、第5章绕流问题和第8章波浪理论;杨大明编写了第3章流体力学实验设备简介和第4章流体力学测试仪器。

在本书的编写过程中,采用了业内人士许多科研成果,奚炜和王义也提供了一定帮助,在此表示衷心的感谢!

由于作者水平有限,错误及不妥之处在所难免,恳请读者批评指正。

编 者

2005年5月

目 录

第1章 绪论	1
1.1 实验流体力学及其简史	1
1.2 实验流体力学的研究内容	2
1.3 实验流体力学的研究方法	3
1.4 实验流体力学的任务和面临的问题	5
第2章 基本理论及其方法	9
2.1 相似理论	9
2.1.1 相似的概念	9
2.1.2 由基本方程组推导流场相似的充分必要条件	11
2.1.3 相似准数	13
2.1.4 相似理论在实验中的应用	17
2.2 水电比拟	24
2.2.1 水电比拟基本原理	24
2.2.2 物体在流体中变速运动的电模拟	32
2.3 数值模拟	36
2.3.1 数值模拟概述	36
2.3.2 数值模拟应用简介	45
2.4 误差分析与数据处理	46
2.4.1 误差的性质及其分类	46
2.4.2 随机误差	46
2.4.3 系统误差	50
2.4.4 粗大误差的判别及剔除	54
2.4.5 测量结果的表示方法	54
2.4.6 测量结果的处理方法	56
2.4.7 动态测试数据的处理	57
第3章 流体力学实验设备简介	60
3.1 循环水槽	60
3.2 风洞	64
3.3 小型流体力学实验设备	69
3.4 流动显示设备及技术	71
第4章 流体力学测试仪器	76
4.1 压力的测量	76
4.1.1 压力的单位	76
4.1.2 静压的测量	77
4.1.3 总压的测量	77

4.1.4 压力计量仪表的分类	78
4.2 液体式压力计	80
4.2.1 U形管压力计	80
4.2.2 单管压力计	81
4.2.3 倾斜式微压计	81
4.2.4 多管压力计	82
4.2.5 补偿式压力计	83
4.2.6 “Π”式压力计	84
4.2.7 液体压力计的使用和维护	84
4.2.8 液体压力计的误差	86
4.3 压力传感器	87
4.4 速度的测量	88
4.4.1 水压式计程仪(毕托管)	88
4.4.2 三孔圆柱形探针	89
4.4.3 五孔球形探针	90
4.4.4 声呐多普勒测速仪	92
4.4.5 激光测速仪(LDV)	92
4.4.6 热线风速仪	94
4.4.7 粒子图像测速(PIV)技术	95
4.5 流量的测量	96
4.6 温度及湿度的测量	99
第5章 绕流问题	102
5.1 绕物体不可压缩流动的概述	102
5.2 势流理论中圆柱绕流	106
5.2.1 绕圆柱体无环流流动	106
5.2.2 绕圆柱体有环流流动	108
5.3 机翼绕流	109
5.3.1 机翼及其特性	109
5.3.2 翼型绕流的电模拟	115
5.4 二元机翼表面压力分布及流体动力特性的实验测定	123
第6章 动量及动量矩定理	130
6.1 理论基础	130
6.2 动量定理在实验中的应用	132
6.2.1 实验6.1:自由射流	132
6.2.2 实验6.2:利用动量定理进行阻力测量	135
第7章 边界层	141
7.1 边界层基本理论	141
7.2 边界层的测量	142
7.2.1 实验7.1:平板层流和紊流边界层	142

7.2.2 测量和计算	144
7.2.3 讨论及进一步实验	148
第 8 章 波浪理论	149
8.1 波浪现象	149
8.2 波浪理论概述	150
8.3 实验室中的波浪模拟	160
8.3.1 水池的主要波浪模拟设备系统	160
8.3.2 主要波浪模拟	164
8.4 船模波浪中运动实验	168
8.4.1 池壁效应	169
8.4.2 舰船在波浪中的运动特性及实验前的模型准备	170
8.4.3 船模运动测量	171
8.4.4 不规则波上船模实验	172
8.4.5 过渡波上的船模实验	173
8.4.6 波浪对航行舰船快速性的影响	173
8.4.7 甲板上浪和砰击的船模实验	176
第 9 章 管道流动	179
9.1 基本理论	179
9.1.1 管道层流流动	180
9.1.2 管道紊流流动	180
9.1.3 利用管嘴和孔口测量管道流动	182
9.2 管道及管嘴内流动实验	184
9.2.1 光滑管内流体流动速度剖面 and 压强损失实验	184
9.2.2 通过管嘴和孔口的流动测定流量	188
第 10 章 可压缩流体流动	192
10.1 可压缩流动的基本方程	192
10.1.1 理想气体的能量方程	192
10.1.2 声速	192
10.1.3 压缩激波: 正激波	194
10.1.4 压缩冲击: 斜激波	195
10.1.5 普朗特—梅耶膨胀	196
10.1.6 流过双楔机翼的二维流动	197
10.1.7 超声速流动中升力的产生	197
10.2 喷管内的可压缩流	198
10.2.1 理想气体的一维等熵膨胀的基本方程	198
10.2.2 实验 10.1: 收缩管和拉伐尔管中的质量流量	201
10.2.3 实验 10.2: 拉伐尔管中的膨胀	206
10.2.4 实验 10.3: 平行喷管中的高亚声速的膨胀	208
参考文献	210

第 1 章 绪 论

流体力学理论体系的形成和发展是与实验研究紧密相连的,这些实验研究过程中依据的最基础的理论支撑、测试系统及其方法、数据处理和误差分析等构成的有机体系就是实验流体力学。它的研究贯穿着流体力学的各个领域,在流体力学的发展历史中,起到了关键性的作用。一方面,它用精细的观察和测量手段揭示流动过程中在流场各处的流态和流动特征;另一方面,通过流动参数的直接测量提供了各种特定流动的物理模型。实验流体力学是和理论流体力学、计算流体力学并列的流体力学三大分支之一,也是实验力学的重要组成部分。

1.1 实验流体力学及其简史

实验流体力学是在人类同自然界做斗争和在生产实践中逐步发展起来的。

秦朝李冰父子带领劳动人民修建的都江堰,至今还在发挥着作用;与此同时,古罗马人建成了大规模的供水管道系统;等等,这些都是实验流体力学巨大成功的范例。

古希腊的阿基米德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。但流体力学尤其是流体动力学作为一门严谨的科学,却是随着经典力学建立了速度、加速度、力、流场等概念,以及质量、动量、能量三个守恒定律的奠定之后才逐步形成的。

17 世纪,力学奠基人牛顿研究了在流体中运动的物体所受到的阻力,得到阻力与流体密度、物体迎流截面积以及运动速度的平方成正比的关系,他针对粘性流体运动时的内摩擦力也提出了牛顿粘性定律;法国人皮托发明了测量流速的皮托管;达朗贝尔对运河中船只的阻力进行了许多实验工作,证实了阻力同物体运动速度之间的平方关系;瑞士的欧拉采用了连续介质的概念,把静力学中压力的概念推广到运动流体中,建立了欧拉方程,正确地用微分方程组描述了无粘流体的运动;伯努利从经典力学的能量守恒出发,研究供水管道中水的流动,精心地安排了实验并加以分析,得出了流体定常运动下的流速、压力、管道扬程之间的关系——伯努利(Bernoulli)方程。

欧拉方程和伯努利方程的建立,是流体动力学作为一个分支学科建立的标志,从此开始了用微分方程和实验测量进行流体运动定量研究的阶段。

从 18 世纪起,势流理论有了很大进展,在水波、潮汐、涡旋运动、声学等方面都阐明了很多规律。法国的拉格朗日对于无旋运动,德国赫尔姆霍兹对于涡旋运动都做了不少研究……

19 世纪,工程师们需要解决许多工程问题,尤其是要解决带有粘性影响的问题,故 1822 年,纳维建立了粘性流体的基本运动方程;1845 年,斯托克斯又以更合理的理论导出了这个方程,并将其所涉及的宏观力学基本概念论证得令人信服。这组方程就是沿用至今的纳维—斯托克斯方程(简称 N-S 方程),它是流体动力学的理论基础。普朗特学派又从推理、数学论证和实验测量等各个角度,建立了边界层理论,能实际计算简单情形下边界层内的流动状态和流体同固体间的粘性力。

20 世纪初,飞机的出现极大地促进了空气动力学的发展。航空事业的发展期望能够揭示飞行器周围的压力分布、飞行器的受力状况和阻力等问题,这就促进了流体力学在实验和理论分析方面的发展。20 世纪初,以儒科夫斯基、恰普雷金、普朗克等为代表的科学家们,开创了以无粘不可压缩流体势流理论为基础的机翼理论,阐明了机翼怎样才能受到升力以及空气如何能把很重的飞机托上天空。机翼理论的正确性,使人们重新认识了无粘流体的理论,肯定了它指导工程设计的重大意义。

机翼理论、边界层理论的建立和发展是流体力学的一次重大进展,它使无粘性流体理论同粘性流体的边界层理论很好地结合起来。随着汽轮机的完善和飞机飞行速度提高到 50m/s 以上,又迅速扩展了从 19 世纪就开始的对空气密度变化效应的实验和理论研究,从而为高速飞行提供了理论指导。

20 世纪 40 年代以后,由于喷气推进和火箭技术的应用,飞行器的速度超过了声速,从而实现了航天飞行,使气体高速流动的研究进展迅速,形成了气体动力学、物理—化学流体动力学等分支学科。

以这些理论为基础,20 世纪 40 年代,关于炸药或天然气等介质中发生的爆轰波又形成了新的理论。为研究原子弹、炸药等起爆后,激波在空气或水中的传播,发展了爆炸波理论。

此后,流体力学又发展了许多分支,如高超声速空气动力学、超声速空气动力学、稀薄空气动力学、电磁流体力学、计算流体力学、两相(气液或气固)流等。

从 20 世纪 60 年代起,流体力学开始了和其他学科的互相交叉渗透,形成新的学科或边缘学科,如物理—化学流体动力学、磁流体力学等。原来基本上只是定性描述的问题,逐步得到定量的研究,生物流变学就是一个例子。

1.2 实验流体力学的研究内容

流体是气体和液体的总称。在人们的生活和生产活动中随时随地都可遇到流体,所以流体力学是与人类日常生活和生产密切相关的。大气和水是最常见的两种流体,大气包围着整个地球,地球表面 70% 以上是水。大气运动、海水运动(包括波浪、潮汐、中尺度涡旋、环流等)乃至地球深处熔浆的流动都是实验流体力学的研究内容。

20 世纪初,在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乃至整个银河系。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连的,这些学科是实验流体力学中最活跃、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,它是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内容。

等离子体是自由电子、带等量正电荷的离子以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。

风对建筑物、桥梁、电缆等的作用使它们承受载荷和激发振动;废气和废水的排放造成环境污染;河床冲刷迁移和海岸遭受侵蚀,研究这些流体本身的运动及其同人类、动植物间的相互作用的学科称为环境流体力学(包括环境空气动力学、建筑空气动力学等)。这是一门涉及经典流体力学、气象学、海洋学、水力学和结构动力学等的新兴边缘学科。

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。

1.3 实验流体力学的研究方法

实验流体力学的研究方法可分为:现场观测及其实物实验,实验室模型实验(模拟),水电模拟、计算机数值计算(模拟)与复杂系统的复合(前述两种及其以上方法的复合)实验4个方面。

现场观测是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测,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往往不能控制,发生条件几乎不可能完全重复出现,这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。

同物理学、化学等学科一样,流体力学离不开实验,尤其是对新的流体运动现象的研究。实验能显示运动特点及其主要趋势,有助于形成概念,检验理论的正确性。200年来流体力学发展史中每一项重大进展都离不开实验。

模型实验在流体力学中占有重要地位。这里所说的模型是指根据数学、物理和理论流体力学等理论指导以及实验室条件,改变研究对象的尺度(放大或缩小)以便能安排实验。有些流动现象难以靠理论计算解决,有的则不可能做原型实验(成本太高或规模太大)。这时,根据模型实验所得的数据可以依据相似理论换算出原型的数据。

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,实验室模拟是研究流体力学或实验流体力学的重要方法。

理论分析是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、物理学和基础力学等手段,观测和研究流体的运动,解释已知的现象,预测可能发生的结果。理论分析的步骤大致如下:

首先,建立“力学模型”,即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,对问题进行简化而建立反映问题本质的“力学模型”。

其次,针对流体运动的特点,用数学语言将质量守恒、动量守恒、能量守恒等定律表达出来,从而得到连续性方程、动量方程和能量方程。此外,还要加上某些联系流动参量的关系式(如状态方程),或者其他方程。

最后,求出方程组的解,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。

从基本概念到基本方程的一系列定量研究,都涉及到很深的数学问题,所以流体力学的发展是以数学的发展为前提。反过来,那些经过了实验和工程实践考验过的流体力学理论,又检验和丰富了数学理论,它所提出的一些未解决的难题,也是进行数学研究、发展数学理论的好课题。依目前数学发展的水平来看,有不少题目将是在今后几十年以内难以从纯数学角度完善解决的。

在流体力学理论中,用简化流体物理性质的方法建立特定的流体的理论模型,用减少自变量和减少未知函数等方法来简化数学问题,在一定的范围内是成功的,并解决了许多实际问题。

20 世纪 50 年代开始,在设计携带人造卫星上天的火箭发动机时,配合实验所做的理论研究,正是依靠一维定常流的引入和简化,才及时得到指导设计的流体力学结论。

此外,流体力学中还经常用各种小扰动的简化,使微分方程和边界条件从非线性的变成线性的。声学是最早在流体力学中采用小扰动方法而取得重大成就的学科。声学中的所谓小扰动,就是指声音在流体中传播时,流体的状态(压力、密度、流体质点的速度)与声音未传到时的差别很小。线性化水波理论、薄机翼理论等虽然由于简化而有些粗略,但都是比较好地采用了小扰动方法的例子。

每种合理的简化都有其力学成果,但也有其局限性。例如,忽略了密度的变化就不能讨论声音的传播;忽略了粘性就不能讨论与它有关的阻力和某些其他效应。掌握合理的简化方法,正确解释简化后得出的规律或结论,全面并充分认识简化模型的适用范围,正确估计它带来的同实际的偏离,正是流体力学理论工作和实验工作的精华。

流体力学的基本方程组非常复杂,在考虑粘性作用时更是如此,如果不靠计算机,就只能对比较简单的情形、简化后的欧拉方程或 $N-S$ 方程进行计算。20 世纪 30 年代~40 年代,对于复杂而又特别重要的流体力学问题,曾组织过人力用几个月甚至几年的时间做数值计算,比如,圆锥做超声速飞行时周围的无粘流场就从 1943 年一直算到 1947 年。

数学的发展,计算机的不断进步,以及流体力学各种计算方法的提出,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,这又促进了流体力学计算方法的发展,并形成了“计算流体力学”。

从 20 世纪 60 年代起,在飞行器和其他涉及流体运动的课题中,经常采用电子计算机做数值模拟,这可以和物理实验相辅相成。数值模拟和实验模拟相互配合,使科学技术的

研究和工程设计的速度加快,并节省开支。数值计算方法最近发展很快,其重要性与日俱增。

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、表面上无联系的现象和实验数据中得出规律性的结论;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形或数据,以建立流动的力学模型和数学模型;最后,还需依靠实验来检验这些模型和模式的完善程度。此外,实际流动往往异常复杂(如湍流),理论分析和数值计算会遇到巨大的数学和计算方面的困难,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。

1.4 实验流体力学的任务和面临的问题

1. 实验流体力学的任务

流体力学在许多分支中的新发现和重大研究成果仍然不断涌现。许多研究领域和课题还有待发掘,远非单纯的理论分析和数值方法能够胜任。因此,不断观察、研究流体的新现象和探索相应的基本规律还是实验流体力学的一项主要任务。

实验流体力学的第二项任务是研究各种流动现象的本构关系。运动流体的本构关系随流体的流态(如层流或湍流)、可压缩性、外力的作用以及边界条件的不同或变化而异。例如,在物体绕流问题中,远离物体的流体运动可以忽略粘性影响,认为只有法向应力起作用;而在物体附近的运动流体应看做是粘性流体,切向应力随着流态变化(层流或湍流)具有本质的不同;当流体的流速接近声速时,流体的应力和应变率之间的关系必须考虑可压缩性的影响,而在稀薄气体中则粘性影响区大大超出通常的边界层概念的量级。特别是对于湍流边界层而言,在它的外沿存在着明显的湍流和非湍流的很不规则的分界面,呈现明显的随机性或不确定性,其应力—应变率关系是十分复杂的。对于大量的实际流体来说,它们的本构关系大多有待于研究和确定。而对于化工、动力、航空、机械和船舶与海洋工程领域中广泛出现的多相流,近水面船舶螺旋桨流场和地效翼船在海面上起飞降落的周围流动,有相变和化学反应的流动,有高浓度固体粒子的流动,以及在高温下带有大量原子、离子和电子成分的等离子体流动等都是实验流体力学大有作为的领域。

实验流体力学的第三项任务是利用模拟技术解决工程实际问题 and 研究流动规律。例如,用某些对流体微元的运动起主要作用的力(如惯性力、弹性力、粘性力、浮力、重力或柯氏力等)组成无量纲参数来确定这些相似性参数和流态转换以及流场特性的定量关系;从而最大限度地精简实验内容,使很多大尺度流体运动的原型可以在实验室内简单的条件下得到重现,或者使得在特定实验条件下的研究结果能在较一般的情况下得到解释。实验技术的诀窍在于怎样利用模拟技术以最小的代价和最少的实验条件来发现、证实或重现某种具有研究价值的物理规律或工程问题,这对大量工程实际问题尤其具有重要意义:一个大型化工设备在设计和施工过程中都需要在缩尺约数十至数千分之一的模型中进行实验,而实验的成败往往决定某一方案的取舍;每一个新型号的飞机、舰船和海洋工程设施的设计过程都需要做大量的模型实验,迄今为止,风洞实验仍是决定飞机气动力方案的主要依据之一。船模水池阻力拖曳和自航实验、船模在方形水池内的耐波性实验和操纵性实验等还是新型船舶性能研究的重要手段。英国渡桥电厂的大型冷却塔倒坍事件及美

国塔柯玛大桥等事件都曾引起国际上的广泛关注并被人们引为不重视实验研究的教训。

实验流体力学的第四项任务是研制新型实验仪器及其设备系统和发展测量方法。实验仪器及其设备系统是开展实验研究的必要手段,在多数情况下实验工作者可以利用或购置现有的产品,他们的任务更多侧重在正确和熟练地使用仪器,并根据仪器和设备的功能范围来设计实验方案和确定实验的目标,因而对仪器的原理、功能以及结构有全面的了解常常是必要的。当然在许多新的实验研究课题中常常需要实验工作者自行研究、设计和开发新的仪器或测量方法。由于各学科分支之间的实验研究方法经常是相互借鉴的,因此实验流体力学的研究人员需要熟知其中的一些重要研究成果、方法和技巧,如湍流、多相流等。当然,在研究新的重大课题时不断研究新的方法也是必要的。

目前,计算机技术的发展和应用在实验流体力学中显示出它越来越大的影响,使许多新的动态或多点的实验研究方法迅速发展起来。它使各种强有力的统计方法在实验中得到广泛的应用,并使迅速发展的图像处理技术和流动显示技术结合起来成为有可能获取整个流场在某一瞬时的全部流动信息的有效方法。计算机技术的应用还进一步加速了仪器的智能化和测量的自动化,使实验技术正在产生革命性的变化。

2. 实验流体力学面临的问题

Prandtl 边界层理论的完成标志着现代意义下的流体力学的形成。Prandtl 的边界层理论还导致了应用数学中有名的渐近匹配法的形成,并迅速而广阔地应用于其他学科中。19 世纪在运河河道中发现的孤立波在 20 世纪 60 年代得到了彻底的解决,既推动了力学和数学的发展,也迅速导致了在其他学科如光学、声学中发现类似的现象。现在孤立波(光学中称孤立子)已成了光通信的基石。

20 世纪 60 年代,为探索为何基于流体力学方程的数值天气预报只能准确到很少几天,而简化了这组方程,之后得到了现在十分著名的 Lorenz 方程。数值计算表明,它的解对初值十分敏感,以致一定时间之后,其值变得几乎完全不可预测了。这一发现开辟了混沌研究新领域,奠定了非线性科学的基础。混沌理论及其应用的研究是目前非常热门的研究领域,近年来,混沌优化、混沌控制或其复合方法在非线性系统中的应用成果累累。这一事实还说明,流体力学方程(N-S 方程)的内涵十分深邃,对它的了解还不是很充分。水波中各种波的非线性作用的研究,也丰富了非线性科学的内容。

流体力学或实验流体力学在工程技术中的作用,更是有目共睹的:飞机的飞行速度得以超过声速、大型火箭和航天飞机的实现、人类登月的成功。为此形成了高超声速气动力学、物理化学流体力学、稀薄气体力学等一系列新的分支学科。为解决喷气机的噪声问题,提出了流体噪声理论。各种高速、高机动性和高敏捷性的军用飞机及安全、舒适的大型民航机的研制成功,同样需要流体力学提供的新思想和新成果。20 世纪 70 年代兴起的海上资源勘探和开采工业,若没有流体力学或实验流体力学的研究成果为基础,研究和建造超过 10 亿美元的海上石油平台是不可能的。巨型舰船、新型潜艇及各种高性能舰船的研制中,流体力学问题仍是首先要加以解决的。其他如地下油气开采也得益于流体力学。大型水利枢纽的设计和建造,离开了水力学是不可能的。各种大型建筑物,如火电站的冷却塔和大跨度桥梁等遭风载破坏的教训,引起了力学界和工程界的密切关注,形成了风工程这门新的学科。大型汽轮机、燃气轮机及涡轮发动机等现代动力机械的研制,提出了许多新的流体力学问题,形成了独特的翼栅及内流理论,其中还伴有高温、化学

反应、多相等复杂因素。总而言之,没有流体力学的发展,21 世纪的许多工程技术,特别是高新技术的发展是不可能的。

流体力学或实验流体力学在取得巨大进展的同时,也留下了大量亟待解决的新问题,不尽快地将它们解决,必然给科学及工程技术的进一步发展带来困难。同时,技术的发展是无止境的。仅以交通运输为例,无论是空中、水上、水下,还是陆地上的交通工具都在朝着更大、更快、更安全、更舒适的方向发展,新问题将层出不穷。

第一个大问题是湍流。经过几代人的努力,对这一问题的认识已大为深入,这才有了上述各项成就。绝大多数情况下,流体运动都处于湍流状态。随着高新技术的发展,发现过去的经验局限性太大,因而亟待在湍流的研究上有所突破。

各种物体如飞机、船舶等航行器在流体中运动特别是在做非定常运动时,会产生十分复杂的流场,其核心问题是各种涡系的生成、消长和流动分离的产生。有关机理的许多问题尚未弄清,因为其中包含复杂的非线性因素。这方面的研究成果将对未来空中及水中航行器的研制产生重大影响。

21 世纪,航天飞机和新一代的超声速民航机的成功研制将首先取决于流体力学的进展。在有关的高温空气动力学中必须放弃原先的热力学平衡的假定,吸气式发动机在超声速流动状态下的混合、点火等,都是过去的理论和实践未能解决的难题,超声速流边界层的控制、减阻以及降噪控制等也带来一系列新问题。

船舶除了向大型化、高速化和智能化的方向发展外,还提出了许多新船型,特别是各类高性能船型,包括贴近水面航行、必要时可升空飞行或降在水面上的地效翼船艇。计算其各种航态和海况下的波浪载荷有极大的困难,由于波浪载荷计算不准而导致在恶劣海况下失事,即使对现代的常规船舶仍是屡见不鲜的。从流体力学或实验流体力学的角度看,地效翼船艇或冲翼艇的困难主要在于有事先未定的自由表面、表面边界条件的非线性、波浪的随机性和不确定性、水表层为湍流以及流体与船舶运动相耦合等。

风浪相互作用机制,至今尚未弄清,而它是天气预报这类全球性重要环节,也是近年来正在探索的通过遥测水面波参数以测量近水面风速这一新技术的基础,这个问题的突破将大大提高收集全球气象数据的广度和精度。海面波浪参数的遥测数据还有可能用以探测潜航的潜艇及海流,但这要开辟传统波浪理论未涉及的有关旋流对波浪的影响这一新的领域。

为了尽可能多地开采地下油气,需要深入研究渗流机理并将其定量化。渗流的研究还有助于了解植物体内液体的运动规律,进而了解各种新陈代谢的宏观机制。化工流程的设计,在相当大的程度上可归结为流体运动的计算问题,包括多相流及非牛顿流。由于流动的复杂性,不少重要化工装置的设计带有很多经验因素,以致不能发挥最大效益。因而针对若干典型化工装置进行深入研究,将为化工设计提供新方法,实现可观的经济效益。在未来生物技术产业化的过程中,会遇到类似或更复杂的情况,因而这方面的研究是真正形成生物技术工业不可缺少的基础。

根据复杂流场计算的需要,各种计算方法和理论还需大大改善,以期能精确捕捉激波和分辨旋涡运动、处理非线性自由表面及湍流问题等。由于计算量特别大,必须开发新的计算机硬件和软件,特别是并行机及其软件,而并行计算软件的开发,必须结合具体的计算对象。因而计算流体力学的发展,既是解决具体问题所需,也是对计算科学做出重要贡

献。

一般说来,一个国家的科学技术水平常常反映在实验室中。因而,实验流体力学的研究在一定意义上反映着整个学科的水平。近年来,我国建造了大量用于尖端科学研究的设备,试制和引进了大量先进的实验仪器,使实验流体力学的研究具备了良好的条件。但是就总的情况来看,实验研究工作的状况和水平与形势的发展和社会的需要是不相适应的。因此,要求实验研究工作者正确地设计和组织实验研究工作、有远见地选择和安排实验课题、合理的使用仪器和充分发挥仪器的作用,研究实验技术并用最有效的方法来实现预期的研究目标,使研究目标具有最大的灵活性,在这无数次的循环中锻炼学识、研究水平和驾驭学科中某个研究领域的能力。

第2章 基本理论及其方法

2.1 相似理论

自然界或工程中的各种流体流动现象的规律性,往往表现为描述该现象特征的各个物理量之间所存在的的函数关系。为了揭示这些客观现象的规律性,一般采用两种研究方法,即实验研究方法和理论研究方法。实验研究方法是研究流体力学的重要方法之一,它可以解决许多理论分析无法解决的复杂问题。由于用实验的方法研究流体力学问题时,流动参量往往有好几个,如速度、压力、密度和温度等,并且这些参量都还有各自的边界条件和初始条件,因此,在实验中如何准确地控制实验条件、整理由实验得到的数据并从中需出具有普遍规律的结论,这就需要相似理论来指导。流体力学实验,绝大多数是模型实验。一般情况下,模型总比实物小得多,实验条件与实物运动的条件也不完全相同。因此,实验工作者必须解决以下两个问题:

(1) 应该怎样来安排实验,使得模型实验的流动状态和实际流动相似,使模型实验的结果符合实际;

(2) 如何把在保持相似的条件下去进行的模型试验所得的数据应用到实际问题中去。

相似理论为这些问题的解决提供了依据,它是进行流体力学实验的理论基础之一。

2.1.1 相似的概念

两个物理现象的相似,应包括描述物理现象的多个方面。例如,对于流体流动的研究就应包括几何相似、运动相似、动力相似和热相似等。

1. 几何相似

两个空间几何图形中对应线段用 l'_i 和 l''_i ($i=1,2,3,\dots,k$) 表示,对应角采用 α'_i 和 α''_i 表示 ($i=1,2,3,\dots,k$),那么它们几何相似的条件是:各对应线段的比例相等,且对应角相等。即

$$\begin{cases} \frac{l'_1}{l''_1} = \frac{l'_2}{l''_2} = \frac{l'_3}{l''_3} = \dots = \frac{l'_i}{l''_i} = C_l \\ \alpha'_1 = \alpha''_1, \alpha'_2 = \alpha''_2, \dots, \alpha'_i = \alpha''_i \end{cases} \quad (2-1)$$

导出量

$$C_s = \frac{S'_1}{S''_1} = \frac{l'^2_1}{l''^2_1} = \dots = \frac{l'^2_i}{l''^2_i} = C_l^2 \quad (2-2)$$

$$C_v = C_l^3 \quad (2-3)$$

式中: C_l 为长度相似常数; C_s 为面积相似常数; C_v 为体积相似常数。

例如,一个正方形和一个菱形,尽管它们对应线段的比总是相等的,但在菱形的内角不是直角(即不为正方形)的情况下,是无法与正方形相似的,这是由于它们的对应角不相等。因而一般情况下,正方形和菱形不是几何相似的。

又如,两个机翼模型要相似,那么至少它们的弦长之比、厚度之比和弯度之比要相等,并且相应的夹角也要相等才行(见图 2-1)。

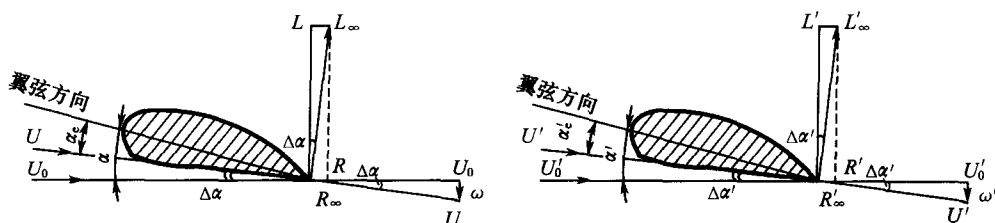


图 2-1 两机翼几何相似的图示

在一般情况下,保持几何相似是模型实验最基本的要求,以后的讨论都是在几何相似的条件下去进行的。

2. 运动相似

在两个流场中,若流经任意两条对应途径所需的时间之比为常数,则称这样的流场为运动相似。

如在实物流场中,流经线段 $l_1, l_2, l_3, \dots$ 所需的时间为 $t_1, t_2, t_3, \dots$,而在模型流场中,流经对应的线段 $l'_1, l'_2, l'_3, \dots$ 所需的时间为 $t'_1, t'_2, t'_3, \dots$ 若这两个流场是运动相似的,则它们之间满足以下的关系

$$\begin{cases} \frac{v'_1}{v''_1} = \frac{v'_2}{v''_2} = \frac{v'_3}{v''_3} = \dots = \frac{v'_i}{v''_i} = C_v \\ \beta'_1 = \beta''_1, \beta'_2 = \beta''_2, \dots, \beta'_i = \beta''_i \end{cases} \quad (2-4)$$

C_v 与 C_l, C_t 的关系为

$$C_v = \frac{v'}{v''} = \frac{\lim_{\Delta t' \rightarrow 0} \frac{\Delta l'}{\Delta t'}}{\lim_{\Delta t'' \rightarrow 0} \frac{\Delta l''}{\Delta t''}} = \lim_{\Delta t' \rightarrow 0} \frac{\Delta l'}{\Delta t'} = \frac{C_l}{C_t} \quad (2-5)$$

C_w 与 C_l, C_t 的关系为

$$C_w = \frac{w'}{w''} = \frac{C_v}{C_t} = \frac{C_l}{C_t^2} \quad (2-6)$$

式中: C_t 为时间相似常数; C_v 为速度相似常数; C_w 为加速度相似常数。

所以,若两个几何相似的物体或流场上的各对应点的速度彼此成比例,且对应点的速度矢量的方位角相等,则称这两个物体或流场的运动为运动相似。

3. 动力相似

在两个流场中的任意对应点上,若各种作用力的力多边形几何相似,则称这两个流场为动力相似。也就是说,如果作用于各对应微元上的微力彼此成比例,且各个力的矢量方位角也相等,那么,就称这两个流场为动力相似,即运动相似系统中,对应点上同名动力学