

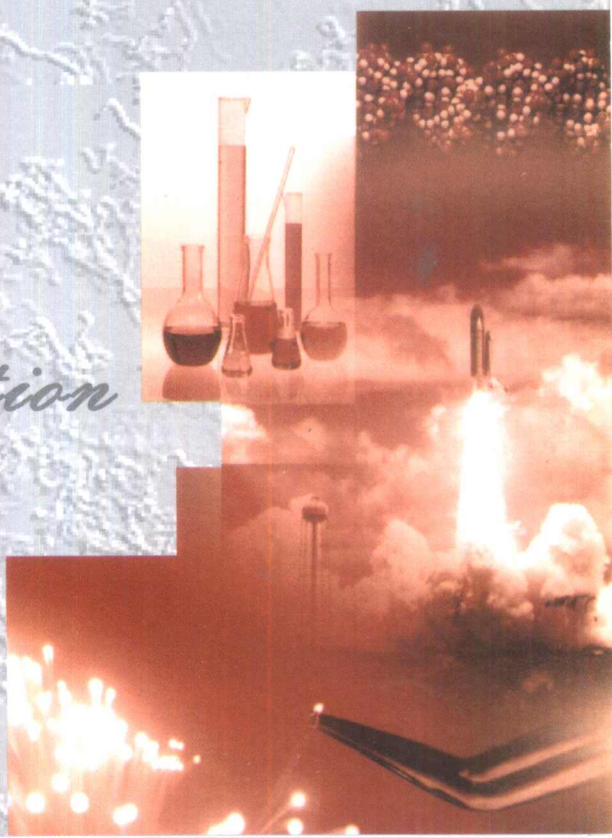


高等学校教材

实验流体力学基础

高永卫 编

*Foundation
Mechanics*



35-43
29

西北工业大学出版社

75
03-1-43
G29
高等学校教材

实验流体力学基础

高永卫 编



西北工业大学出版社

【内容简介】 本书主要介绍实验流体力学的基本原理和基本方法。全书共分 6 章,系统地讲述了流体的基本性质、相似理论、误差理论、流体力学实验的基本设备和基本方法,并介绍了实验研究中需要了解的一般概念和基本要求以及实验流体力学发展的最新动向。

本书可供大专院校有关专业的高年级学生及相应专业的工程技术人员学习和参考。

图书在版编目(CIP)数据

实验流体力学基础/高永卫编. —西安:西北工业大学出版社,2002.5

ISBN 7-5612-1465-0

I. 实… II. 高… III. 流体力学 IV. 035

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 017759 号

出版发行:西北工业大学出版社

通信地址:西安市友谊西路 127 号,邮编:710072 电话:029-8493844

网 址: <http://www.nwpup.com>

印刷者:西北工业大学出版社印刷厂

开 本:850×1168mm 1/32

印 张:4.25

字 数:102 千字

版 次:2002 年 5 月 第 1 版 2002 年 5 月 第 1 次印刷

印 数:1~2 000 册

定 价:6.00 元

前 言

本书是西北工业大学“九五”规划教材,是为流体力学及相关专业的初学者在短时间内的入门而编写的。

随着教育改革的进一步深入,要求学生的专业基础要牢、知识面要宽,这样,学生每门专业课的学时数就会相当有限。专业课的学时一般在 30 学时左右,在如此短的时间内让学生掌握太多的专门知识是不可能的。因此,本书力求既重点突出又较系统完整。主要介绍流体的基本性质、相似理论、误差理论、流体力学实验的基本设备和基本方法,以及实验流体力学的最新发展。内容深入浅出,可在较短的时间内,使初学者了解实验流体力学中最基本的理论、方法和最新发展,为以后的学习和工作奠定良好的基础。

本书是在学习和借鉴了大量有关文献资料的基础上编写的。在成书的过程中得到了西北工业大学教务处和飞机系有关领导和专家的支持与指导。尤其是北京航空航天大学的张华副教授在百忙之中仍认真审阅了全文并提出许多宝贵意见。在这里编者对各方面的支持和资料的提供者们表示衷心的感谢。限于编者的水平,书中错误和不当之处在所难免,恳请各方面的专家学者批评指正。

编 者

目 录

第 1 章 绪论	1
第 2 章 流体的基本性质	8
§ 2-1 流体静力学方面的基本特性	8
§ 2-2 流体动力学方面的基本特性	10
第 3 章 相似理论	18
§ 3-1 相似与相似定理	19
§ 3-2 Π 定理与量纲分析	31
§ 3-3 相似定理的实际应用	35
第 4 章 误差理论	39
§ 4-1 基本概念	39
§ 4-2 直接测量误差的处理	43
§ 4-3 间接测量误差的处理	58
§ 4-4 实验数据处理	63
第 5 章 流体力学实验的基本设备与基本方法	70
§ 5-1 流体力学实验的基本设备	71
§ 5-2 天平测力法简介	80

§ 5-3 流动参数的测量	82
§ 5-4 流动显示技术简介	100
§ 5-5 实验技术应用举例	102
第 6 章 实验流体力学的新发展	107
§ 6-1 数据处理技术	107
§ 6-2 测力技术	112
§ 6-3 流体流动参数的测量	113
§ 6-4 流动显示技术	115
附录	118
附录 1	118
附录 2	119
附录 3	121
附录 4	123
参考文献	125
后记	126

第 1 章 绪 论

学习本章后应掌握的内容:

1. 科学实验的定义和基本特点。
2. 实验中应遵循的基本原则。
3. 实验研究内容和仪器、设备的分类。
4. 实验流体力学的研究内容和意义。

科学实验是迷人的。

罗姆·哈勒(英)在《伟大的科学实验》一书的开始就说到:“科学实验的迷人之处是多方面的,单是实验设备就具有一种特殊的魅力。实验用的设备不但是—种艺术珍品,而且也是一种神奇的器械。”他道出了许多从事实验研究人员的心声。那精巧的设计,优良的性能,优雅的外观,似乎是人类专有的奢侈品。那种魅力不亚于任何时尚物品。

很多科学实验工作者的工作动机具有强烈的浪漫主义色彩。他们从事科学实验研究的目的是为了实现在心中的理想,而非仅仅为了一日三餐的来源。相信读者中的许多人也是从很小的时候就有着一一种似乎与生俱来的冲动,那就是要用自己的力量打开大自然的奥秘之门,向世人展现各种自然现象间的内在联系,甚至想通过操纵某些仪器而改变大自然的进程。再试想一下,自然规律在你的掌握之中,自然现象的发生与否在你的控制之下,就像罗姆·哈勒表述的那样“当电流表显示出看不见的电流在通过,或一种液体突然间变成棉花一样的固体时,你会感觉到一种强大的自然力

量,一种服从你意志的强大的自然力量。”那种成功的感觉是无法用语言表达的。或许正是这种感觉,会使你终身从事科学实验研究。

科学实验除了具有极大的魅力之外,更重要的是,它是探索证明实验知识的严密方法和可靠基础。20 世纪最伟大的科学家爱因斯坦曾经说过一句非常有名的话:“一个漂亮的实验往往比从我们头脑中想出来的 20 个公式更有价值。”现代力学问题,就其总体来说,能列出方程给出分析公式的是少数,而能列出方程,给出边界条件和初始条件,并得出精确解的更是少数。所以说,客观上科学实验仍然是解决多数力学问题的主要方法。

一、什么是科学实验

科学实验是指人们根据研究的目的,利用科学仪器和设备,人为地控制或模拟自然现象(指自然科学实验),排除干扰,突出主要因素,在有利于研究的条件下探索自然规律的认识活动。马克思指出:“物理学者考察自然过程,就是要在它表现得最为精密准确并且最少受扰乱影响的地方进行考察;或者在可能的时候,在各种条件保证过程纯粹进行的地方进行实验。”

科学实验最基本的特点有两个:目的性和干预性。

目的性是指实验要有明确的目的。没有目的实验是没有意义的,这一点是很明显的。如果不知道要做什么,又为什么要做呢?需要强调的是,实验者必须有精确的概念体系用来认识、区别和描述他的实验过程与结论。实验者必须要有较高的理论素养,要对实验过程和结果有足够的预计,做到有目的地进行实验。

干预性是指实验者要积极干预自然过程。因为在几乎所有自然现象发生的过程中都同时有许多过程和力量在起作用。绝大多数自然现象都是多种原因共同造成的。为了理解自然过程,如果可能的话,人们希望能对每个原因所造成的影响单独地进行研究。

实验家们常常把自己的活动说成是隔离和控制。仅仅对自然现象进行观察和分析而不进行主动干预的研究活动不能称为实验。比如,达尔文的工作就不能称为实验工作。他周游世界,写下了大量关于自然生长的动植物笔记。他仅通过观察与比较建立了进化论。

二、实验研究中应遵循的几个原则

为了更好地进行研究,为了使研究成果能为人们认识和认可,为认识世界和改造世界做出贡献,实验研究中应遵循的原则有很多。对于初学者,本书强调三个原则:条件性、精准性和再现性。

条件性原则一方面指实验研究中要尽可能地注意到使作为研究基础成立的所有前提条件。比如我们研究低层大气时应用连续介质假设,建立了一整套理论。通常不会引入太大误差。如果要研究高空稀薄气体,直接应用连续介质假设和基于它的理论体系作为依据就不合适了。条件性原则的另一方面是指研究者应尽量全面、详细地记录研究时的各种环境条件。例如在做流体力学实验时通常都要记录当时的大气温度、湿度、压力等等。这样做可以监测实验时各种条件的变化,必要时采取适当措施保证实验过程纯粹地进行。这样做还有一个好处就是,日后自己或别人进行相关的研究时,资料会比较齐全。仅通过研究这样的资料就可以减少很多无谓地重复。而且由于人们认识水平的提高或研究问题角度的变化,对于某些过去认为不太重要而常常忽略的条件,如果有实验时各种条件的详细记录也许会有意想不到的发现。

精准性原则一方面是指研究者要尽量追求高的精准性。如果测量一个人的身高,其结果是此人身高 $(1.8 \pm 1.0)\text{m}$,这样的结果恐怕是没有什么实际意义的。另外一方面是指研究者要清楚,即使再精益求精,研究结果总是会有一定误差的。遇到相同的实验却有不完全相同的结果时,就要会仔细分析差异是否合理,而不会不知所措。还有,因为研究总是会有误差的,所以只要误差在合理

的范围之内,就没有必要再浪费大量的人力、物力去追求过于高的精准性。

再现性原则是指要让别人认可你的研究结果,首要条件是别人在你所提供的条件下,也同样能再现你的实验结果。这一点很重要,不可再现的实验结果是无法得到公认的。为了能够使别人再现你的结果你就得注意前面提到的条件性原则,你必须全面、详细、准确地提供你研究时的条件。另外,精准性原则告诉我们,再现并不是绝对重复,只要差异在合理的范围之内,就可以认为实验结果已经再现了。所以,条件性原则和精准性原则是再现性原则的基础。

三、实验研究的问题

实验研究的问题可分为三大类。

(1)把不同条件下的某些可变特性测量出来,从而建立某种定律。这是一类研究中最常见的实验问题。为了得出波义耳定律而进行的一系列实验就是这类研究的例子。

(2)试图把考察中已发现的物质结构和有关的作用过程联系起来。通俗一点说就是考察业已存在的物质构造起什么作用。鲨鱼是游速比较快的动物。但是人们发现它的皮肤并不光滑,而是顺着游动方向存在大量细小的沟槽。通过研究这些沟槽,人们发现了沟槽减阻原理。

(3)检验理论或验证设计。这类实验用以揭示现实世界中尚未发现的物质,或发现设计中存在的问题等。比如新设计的飞机在设计、定型过程中进行的大量风洞实验即属于此类实验。

四、自变因素、因变因素和参数

自变因素就是实验者在实验中直接控制的因素。因变因素是指受自变因素影响而相应变化的因素。例如:“聪明”的厨师控制

掺入菜肴里食盐的数量(自变因素),以此可以影响就餐者的饮水量(因变因素),从而在一定程度上操纵饮料的消费。

在经过精心设计的实验中可以做到,除了供研究的自变因素和因变因素以外,把其他因素保持不变。这种不变因素常称为“参数”。通过参数可以确定可变因素变化的环境条件。确定参数需要实验者有一定的技巧。例如,在测量空气弹性的实验中,波义耳和胡克是保持集气室的空气温度不变;而稍后的实验家,如阿马加特和安德鲁斯在重新进行这一实验时,却选择了另一些不同的温度,并发现,用不同参数值可得出不同定律。

五、仪器和设备

实验仪器和设备可以分成三大类:一是测量仪器,如钟表、计量仪、刻度尺等;二是扩大人的感觉能力的仪器,如显微镜、望远镜、放大镜、透视镜等;三是使实验者能够把所要研究的效应和可能的原因进行隔离的设备,这通常是很重要的一类。

需要指出的是,测量和扩大感觉能力的仪器设备,在设计和使用时,都与某些科学假设和信念有关。就拿测量金属棒长度的刻度尺来说,当你读取金属棒长度的测量结果时,你就得做一系列的物理假设。首先得假设金属棒端头和判断的刻度是准确相符的,而用眼睛进行判读时,又得假设光线从光源是以直线方式射入你的眼睛的。其次,如果测量操作要求尺子运动,那就需要做更深奥的假设了。比如,测量是在尺子沿着物体边缘的运动中进行时,就得假设尺子即不增长,也不缩短。这看来似乎很明显。但是如果以运动的测量仪器测量相对静止的物体,那么事实已经证明,我们的一般感觉是错误的。测量仪器在运动中测量相对静止的物体时,测量仪器顺其运动方向上就“缩短”了。而被测物体就显得比用相对静止的测量仪器测出来的要长一些。这就要很微妙的物理学来修正这种误差。测量中要用到假设还很多,这里就不一一列

举了。

比测量和扩大感觉能力的仪器更为重要的是隔离设备。它的作用是使每一个影响或趋势都能够单独地进行研究。怎样才能做到这样呢？要建立一套这样的设备，实际上就是要创造一个隔离环境。在建造设备时，把外界环境简化，使研究对象能够控制。设备的布置要使所有的外界影响不是被排除，就是可以被控制，作为参数保持不变。米切尔森和莫利在测量光的速度时把他们的设备浮在水银池里，就是为了隔绝克里兰城市产生的振动干扰。再如，波义耳和胡克在提高密闭空气压力过程中，空气温度会升高，但他们总是使它重新冷却到室内温度。他们虽然不能消除温度的影响，但通过保持温度不变，可以假设其影响也不变。

六、实验流体力学

实验流体力学是研究流体力学实验的基本理论、实验设备、实验方法和实验数据修正与处理的一门流体力学学科分支。

流体力学实验是科学实验。它研究的内容涉及科学实验研究问题的各个方面。

通过流体力学实验可以揭示流动的特性及本质，发现新的现象，从而开拓流体力学研究的领域。流体力学中各种复杂物理现象大都是首先通过实验逐步认识的。例如，附面层的存在及其特性、紊流结构等等都是在实验研究的基础上发展起来的。

通过流体力学实验可以建立流体力学定律，指导研究与应用。众所周知，流体力学的静力学理论是通过实验完整地建立起来的。浮力原理、帕斯卡定律和连通器原理等都是基于观察和测量实验得出来的。

通过流体力学实验可以检验理论、验证设计或为设计提供原始数据。例如，在飞机研制和改型过程中，只有把理论计算与实验密切地结合起来，才能全面地解决各种复杂的空气动力学问题。

通常的做法是先根据已有的理论结果和实验结果,结合具体要求进行计算,为研制和改型指出方向,定出几种初步方案。然后通过空气动力实验取得各种情况下的数据。接下来在对数据进行分析、比较。最后根据实验结果将飞机定型。这样做主要是由于飞机外形和流动现象比较复杂,可靠的空气动力数据只能从实验中得到的。

总之,实验在整个流体力学的建立、发展和应用中都起着重要的作用。

实验流体力学领域要用到很多独特的设备、仪器和实验方法。在实验设备方面有风洞、水洞、水槽、旋臂机、火箭车。在仪器方面有激光测速仪、红外测速仪、热线热膜测速仪、风速管、气动力天平、压力检测系统、温度检测系统等等。实验方法方面主要有测力法、表面压力测量法、流场测量法和流动显示法。

作为入门教材,本书仅介绍实验流体力学中最基础、最常用的一些内容。使读者能够在较短的时间里对实验和实验流体力学有一个较为清晰的认识,使初学者能够打下一个较好的基础。对于一些很专门的内容,本书后附有参考文献,读者可以根据需要去查阅。为了能够更好地掌握本书的内容,读者应重视动手实验的机会,多去实验室。勤动手、勤思考。相信通过认真的学习,读者会对实验流体力学产生浓厚的兴趣,并对今后的学习和工作有所裨益。

思考题

1. 什么样的认识活动是科学实验? 其特点是什么?
2. 实验中遵循的基本原则有哪些?
3. 实验研究内容和仪器、设备的分类如何?
4. 实验流体力学的研究内容和意义是什么?
5. 怎样才能学好实验流体力学这门实验技术基础课?

第 2 章 流体的基本性质

学习本章后应掌握的内容：

1. 流体静力学方面的基本特性,包括连续介质的概念,流体压强、温度和密度的定义,压缩性与音速的关系等。
2. 流体动力学方面的基本特性,包括流体黏性、层流与紊流、边界层、分离等的概念和特点,连续方程和动量方程等流动遵守的基本规律。

要进行有目的的流体力学实验研究就必须对流体的基本特性有所了解。下面将结合典型实验对流体最基本的特性作简要回顾。通过典型实验不仅可以加深对流体特性的认识,更重要的是可以从中学到如何用实验作为手段来进行科学研究。

§ 2-1 流体静力学方面的基本特性

一、连续介质的概念

所谓连续介质的概念是把介质看成是连绵一片的流体,假设介质所占据空间里到处都弥布了这种介质,而不再有空隙。采用连续介质假设后,不仅给描述流体的物理属性和流动状态带来了很大的方便,更重要的是,为采用强有力的数学工具进行理论研究提供了可能性。

二、密度、压强与温度

流体的密度 ρ 是指流体所占空间内、单位体积包含的质量。如流体的质量为 m ，占有的体积为 V ，则 $\rho = m/V$ ，单位是 kg/m^3 。

流体的温度 T 是流体分子运动剧烈程度的指标，热力学单位是 K。以 K 为单位的 T 与以 $^{\circ}\text{C}$ 为单位的摄氏温度 t 的关系是 $T = 273.15 + t$ 。

流体的压强 p 是指作用在单位面积上且方向垂直于此面积（沿内法线方向）的力，俗称压力，单位是 Pa。

气体的 ρ 、 T 和 p 三个参数称为气体的状态参数。通过实验，它们之间有下列关系存在，即

$$p = \rho R T \quad (2-1)$$

式(2-1)常称为气体的状态方程，式中， R 称为气体常量，单位是 $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 。当 $p = 1.0132 \times 10^5 \text{ Pa}$ ， $T = 293.15 \text{ K}$ 时，空气的 $R = 287.06 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 。在低层大气内，如果不遇十分高的温度，没有离解现象发生的话，这个 R 值都是可以用的。

三、流体的可压缩性与声速

流体的可压缩性是当压力或温度变化时流体改变自己体积或密度的性质（也称弹性）。液体对这种变化的反应很小，因此一般认为液体是不可压缩的，即液体是密度 ρ 等于常数的流体。气体对这种变化的反应都很大，所以，一般来讲气体是可压缩的流体。

声速 a 是指声波在流体中传播的速度，单位是 m/s 。

流体的可压缩性越大，声速越小；流体的可压缩性越小，声速越大，实验表明，在水中的声速大约为 1440 m/s （大约 5200 km/h ）。而在海平面标准状态下，空气中的声速仅为 341 m/s （ 1227 km/h ）。在完全不可压缩流体中，声速将趋于无限大。

§ 2-2 流体动力学方面的基本特性

一、黏性

众所周知,摩擦有两种,即外摩擦和内摩擦。一个固体在另一固体上滑动时产生的摩擦叫外摩擦,而同一种流体相邻流动层之间发生滑动时产生的摩擦叫内摩擦,也称为流体的黏性。

典型实验:关于液体黏滞性的库仑实验

(1) 取三个固体圆盘。三者的表面光滑程度不同,分别是普通表面、光滑表面(在普通表面涂蜡并抛光)和粗糙表面(将普通表面用细砂纸打毛)。将三者分别置于图 2-1 所示的容器中,转动圆盘并放开让其自由地逐渐停止。实验中除了三者的表面光滑程度不同以外,其余均相同。试问三者的衰减时间哪一个最长?哪一个最短?

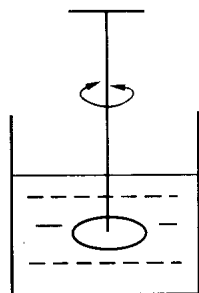


图 2-1 关于液体黏性的库仑实验

实验结果是三者的衰减时间相同。

究其原因,在这个实验中,使圆盘停下来的摩擦力不是液体与固体的外摩擦力,而是液体内部的内摩擦力。因为在固体表面的液体总是黏附在固体表面的,它与固体表面没有相对运动。(这称为黏附性条件。)所以衰减时间与固体表面的光滑程度无关。

(2) 将上述实验中圆盘在液体中的深度增加,使其所处的压力增加。那么在不同深度(即不同压力)条件下情况又会怎样呢?

实验结果表明衰减时间与深度无关,也就是说黏性与压力无关。单位面积上的摩擦力称为摩擦应力,记为 τ 。牛顿提出,流体内部的摩擦应力 τ 和速度梯度 $\frac{du}{dn}$ 的关系为

$$\tau \propto \frac{du}{dn} \quad (2-2)$$

比例常数记为 μ ,则

$$\tau = \mu \frac{du}{dn} \quad (2-3)$$

式(2-3)称为牛顿黏性定律。 μ 称为黏性系数,不同的介质 μ 值各不相同;同一种介质的 μ 值随温度变化而和压强基本无关。

这是流体黏性方面两个很重要的特点。

应该指出,气体和液体产生黏性的物理原因是不同的。随着流体温度的升高,气体的 μ 值将增加,但液体的 μ 值反而减小。对气体来讲,相邻流动层相互滑动产生摩擦的物理原因是气体分子有横向动量交换,流动速度较快的一层气体中的分子跳入速度较慢的一层气体中时,有拖快该层使其加速的作用;反之,流动速度较慢的一层气体中的分子跳入速度较快的一层气体中,则有拖慢该层使其减速的作用。因此在两滑动层间出现了相互牵动、阻止相互滑动的作用。温度升高,分子间的这种横向动量交换也加剧,故 μ 值增大也就不难理解了。而液体产生黏性的物理原因主要来自相邻流动层分子间的内聚力,随着温度升高,液体分子热运动加剧,液体分子间距离变大,分子间的内聚力将随之减小,故 μ 值减小。所以,采用管道来输运液体(如石油)时,对液体加温(特别是在寒冷地区的冬季)可以收到减小流动损失、节省能耗的效果。

二、层流与紊流

典型实验:关于圆管内流体流动的雷诺实验(见图2-2)

雷诺(Reynolds)1883年在圆管流动的实验中用针管在流动