

高等学校规划教材 · 力学
PROGRAMMING TEXTBOOKS FOR HIGHER EDUCATION



(第2版)

实验流体力学基础

高永卫 孟宣市 肖春生 编

西北工业大学出版社

高等学校规划教材·力学

实验流体力学基础

(第2版)

高永卫 孟宣市 肖春生 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。全书共分为 7 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,并介绍了流体力学实验研究中需要了解的一般概念和基本要求以及本学科发展的最新动向。

本书可供高等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,孟宣市,肖春生编. —西安:西北工业大学出版社,2011.3
ISBN 978-7-5612-3043-5

I. ①实… II. ①高… ②孟… ③肖… III. ①流体力学—实验 IV. O35-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 037632 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)88493844 88491757

网 址:www.nwpu.com

印 刷 者:陕西兴平报社印刷厂

开 本:787 mm×1 092 mm 1/16

印 张:7.25

字 数:172 千字

版 次:2011 年 3 月第 2 版 2011 年 3 月第 1 次印刷

定 价:18.00 元

前 言

本书是西北工业大学“十二五”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业知识是不可能的。因此,本书力求既重点突出又较系统完整。本书主要介绍流体的基本性质、相似理论、误差理论、流体力学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。

本书共分 7 章,第一章、第二章由高永卫编写,第三章至第五章由孟宣市编写,第六章、第七章以及附录由肖春生编写。全书由高永卫统稿。书中的插图主要由孟宣市绘制。

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出版社有关领导和专家的支持与指导,在这里编者对他们和资料的提供者表示衷心的感谢。

由于水平有限,书中的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

2010 年 10 月

目 录

第一章 绪论.....	1
思考题.....	4
第二章 流体的基本性质.....	5
第一节 流体静力学方面的基本特性.....	5
第二节 流体动力学方面的特性.....	6
思考题	11
第三章 相似理论	12
第一节 相似与相似定理	13
第二节 Π 定理与量纲分析	23
第三节 相似理论的应用	26
思考题	28
第四章 误差理论	29
第一节 基本概念	29
第二节 直接测量误差的处理	32
第三节 间接测量误差的处理	40
第四节 实验数据处理	43
思考题	47
第五章 流体力学实验的基本设备	48
第一节 流体力学实验的基本设备概述	48
第二节 低速风洞	49
第三节 超声速风洞	56
第四节 跨声速风洞	60
第五节 高超声速风洞	62
第六节 水洞	65
思考题	66
第六章 流体力学实验的基本方法	67
第一节 测力实验简介	67
第二节 流动参数的测量	70

第三节 应用举例	90
思考题	92
第七章 实验流体力学的新进展	93
第一节 数据处理技术	93
第二节 测力技术	98
第三节 流体流动参数的测量	99
思考题	104
附录	105
附录 1 标准大气简表	105
附录 2 空气动力学中常用的有量纲物理量的 SI 单位和量纲	106
附录 3 水的密度(随温度而变)	107
附录 4 常用物理常数	108
参考文献	109
后记	110

第一章 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、仪器和设备的分类。
- (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。”他道出了许多从事实验研究人员的心声。科学实验的确是很迷人的，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，会感觉到一种强大的自然力量，一种服从意志的强大的自然力量。或许正是这种感觉，会使我们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，它是探索证明实际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，而能列出方程并给出边界条件和初始条件，给出计算公式并得出精确解的更是少数。因此，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

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。”也就是说，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。

科学实验最基本的特点是两个：目的性和干预性。

目的性是指实验要有明确的目的。没有目的的实验是没有意义的。需要强调的是，实验者必须有精确的概念体系来认识、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，否则实验就没有任何意义。

干预性是指实验者要积极干预自然过程。几乎所有自然现象发生的过程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，人们希望对每个原因所影响的过程进行单独研究。实验家常常把自己的活动说成

是隔离和控制自变因素和因变因素。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。

二、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,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)。但是自然界中几乎没有这么简单的、只通过一个自变因素就可控制的过程。

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。

三、实验研究的问题

实验研究的问题可分为以下三大类:

(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。在这类研究中,只要扩大控制范围就很容易找到相应的定律能够成立的极限。如果要问,当压力很高,或温度很低,或气体密度比普通空气密度大得多的时候,波义耳定律还能继续有效吗?只要扩大相应的自变量的范围,就可以找到答案。

(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。也可以说考察业已存在的物质构造起什么作用。内赫米亚·格鲁发现树干构造中充满连续不断的液体导管,赫尔斯正是在考察这些液体导管的作用时发现了植物液体循环。

(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、定形过程中进行的大量风洞实验即属于此类实验。

四、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。例如,测量金属棒长度的刻度尺,当读取金属棒长度的测量结果时,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,当尺子是在沿着物体边缘的运动中进行时,就得假设尺子既不增长,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。这就要用很微妙的物理学来修正这种误差。测量中要用到的假设还很多,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。有时也需要使外界的影响受到控制,使其对设备产生的影响保持不变。例如,波义耳和胡克在提高密闭空气压力的过程中,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。

五、实验研究中应遵循的几个原则

为了能更好地进行研究,为了使研究成果能被人们认识和认可,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也有很多。对于初学者,本书强调三个原则:条件性、精准性和再现性。

条件性原则一方面是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。比如作为研究基础的某理论成立的前提条件,研究者要非常清楚,如果研究时该前提条件不存在,则该理论不能作为研究的基础。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,当时的大气温度、湿度、压力等,以保证实验过程纯粹进行。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的重复,而且还可能有意想不到的发现。

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。另一方面是指研究者也要清楚,即使再精益求精,研究结果总会有一定误差的。认识到这一点,遇到相同的实验却有不完全相同的结果时,就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,必须全面、详细、准确地提供研究时的条件。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,就可认为实验结果已经再现了。因此,条件性原则和精准性原则是再现性原则的基础。

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体和流动的特性及本质,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。1738年,伯努利·D

(1700—1782 年)在对容器口出流与变截面管道流动进行了广泛深入的观察与仔细的测量以后,提出了定常、无黏性、不可压缩流动的伯努利定理。1742 年,其父伯努利·J(1667—1749 年)加以完善并将其推广至非定常情况。1757 年,欧拉又将其推广至可压缩情况,并导出沿流线的伯努利方程。可见,应用非常广泛的伯努利方程首先是建立在实验的基础上的。

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。然后再通过空气动力实验取得各种情况下的大量数据。接下来对数据进行分析、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都比较复杂,可靠的空气动力数据只能从实验中得到。

可以看出,实验为整个流体力学的建立、发展和应用都起着重要的作用。

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、火箭车等。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。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。详细的介绍参见后面的章节。

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?

第二章 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，压缩性与声速的关系等。

(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循的基本规律。

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进行科学研究。

第一节 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，假设介质所占据的空间里到处都密布了这种介质，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、温度与压强

流体的密度 ρ 是指流体所占空间内、单位体积中包含的质量。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 称为气体常数，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 $R = 286.8 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 。每种单一的气体各有其气体常数值。空气是一种混合气，这个常数是根据其各组成成分所占的质量分数算出来的。如果组分改变了，这个常数就不能用了。在低层大气内，如果不遇到十分高的温度，没有离解现象发生的话，这个值都是可以用的。

三、流体的可压缩性与声速

流体的可压缩性是指当压力或温度变化时流体改变自己的体积或密度的性质(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 ρ 等于常数的流体。气体对这种变化的反应都很大,因此,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 $1\,440\text{m/s}$ (大约 $5\,200\text{km/h}$)。而在海平面标准状态下,空气中的声速仅为 341m/s ($1\,227\text{km/h}$)。在完全不可压缩流体中,声速将趋于无限大。

第二节 流体动力学方面的特性

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)。将三者分别置于如图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?

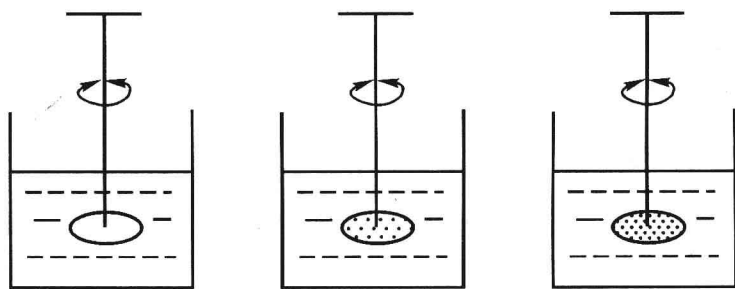


图 2-1 关于液体黏性的库仑实验

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(这叫做黏附性条件),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,并使三者所处的压力增加不同的值。那么不同压力条件下情况又会怎样呢?

实验结果是三者的衰减时间仍然相同。这表明衰减时间与深度无关,也就是说黏性与压力无关。

这是流体黏性方面两个很重要的特点。

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。式中, 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。

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,故黏性系数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。因此,采用管道来运输液体(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)。

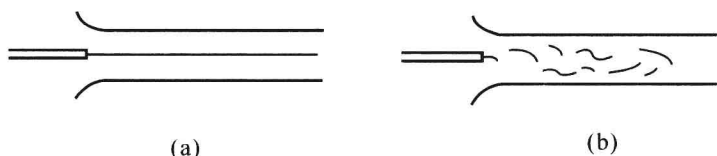


图2-2 雷诺管流实验示意图

雷诺(Reynolds)1883年在圆管流动的实验中用针管在流动中引入染色剂。在圆管中水流速度不大时,色水从头到尾保持一条清晰的线。这说明,管中的水流在流动的过程中是分层而各不相扰的,其中分子扩散起主要作用,这种流动称为层流。在流速大到一定程度以后,这条色水只能维持很短的一段,往下流,便会突然一下子散开来,而不再是一条线了。这说明流体微团除了有纵向(即管轴线方向)的流速之外,还有不规则的横向速度,结果把各层的流体搅混了。这种流动称为紊流。紊流中涡的扩散起主要作用。

雷诺实验使我们看到了层流和紊流,但雷诺的研究并没有到此为止,他继续取不同的管径和不同的流速进行系统的研究。实验研究发现,层流向紊流的突然转变,不只取决于流速,而是取决于一个组合参数

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu} \quad (2-4)$$

式中 Re —— 雷诺数；
 ρ —— 液体的密度；
 v —— 流速；
 D —— 圆管直径。

这个实验值得注意的是，它不仅将层流流动和紊流流动直观地显示给我们，更重要的是，它提出了一个无因次参数 Re 数。虽然圆管流动的图画与介质的密度、流速以及圆管的直径都有关系，但只要 Re 保持不变，其流动图画就不变。显然用 Re 数的大小来表征圆管流动比分别用 ρ, v, D 来描述更简单、更有意义。这种用无因次参数描述流动的方法以后我们会经常用到，它可以大大简化研究过程，对实验研究有着非常重要的意义。

实际上，除雷诺数之外，还有一些因素可以促使层流转变为紊流。如管壁的粗糙度，越粗糙越容易转变为紊流；还有圆管的入口形状，如果形状不圆滑的话，也容易使流动转变为紊流。实验发现这个转变的雷诺数有一个范围，低的可以到 2 000，即雷诺数一旦大过 2 000，层流就变为紊流了；高的可以到 13 000，即雷诺数要大过 13 000 才会转变为紊流。用十分光滑的管壁，入口喇叭口的形状也特别圆滑，实验曾做到雷诺数 40 000 仍是层流，超过 40 000 才转变为紊流。但 2 000 却是最低的转变雷诺数了，再低，层流是很稳定的，不论壁管多么粗糙，流动都不会变为紊流。

三、层流边界层、紊流边界层与分离

典型实验：圆球实验。

将一个光滑圆球置于匀直气流当中测其所受阻力，如图 2-3(a) 所示。开始时，随着气流速度的增加，阻力也随着增加；继续增加流速，流速达到某一特定值，阻力会突然下降很多甚至低于小风速时的情形；随后继续增加风速，阻力又开始不断增加，如图 2-3(b) 所示。

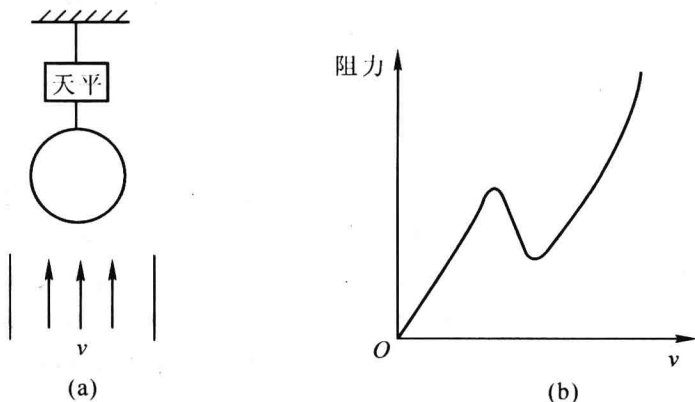


图 2-3 圆球阻力实验示意图

为什么风速增加到某一值圆球所受阻力会突然下降呢？

为了解释这个现象，首先要介绍边界层和分离的概念。

由于流体有黏附性条件以及黏性的作用,在流体流过物体表面时,流体会黏附在物体表面,这部分流体与物面的相对速度为零。沿物面法向向外,气流速度会逐渐由零一点点变大,在离物面一定距离时,流速才与来流没有显著的差别。这个从零速度到主流速度的过渡空间就叫做边界层。边界层中的流态有两种:层流与紊流。

分离是指流体的流动不再沿物面的流动。分离后的流体压强等于分离点的压强。

圆球所受阻力包括摩擦阻力和压差阻力。在这个问题中,压差阻力是主要的。当速度小(雷诺数较低)时,圆球表面上的边界层为层流型。层流边界层分离点靠前,压差阻力较大。随着速度(雷诺数)的增加,层流边界层在球面上某处转捩为紊流边界层。而紊流边界层不易分离,分离点靠后,因此压差阻力比较小。可以看出是雷诺数的变化使得边界层的性质变化,从而引起分离点的移动,才使得圆球阻力发生上述变化。还可以看出,边界层的性质对流动的影响有时是非常大的。实际上,边界层的性质受到很多因素的影响,它至今仍是人们研究的重点之一。

四、流体流动的基本规律

流体绕物体流动时的各个物理量,比如速度、压力和温度都会发生变化。这些变化都必须遵循一些最基本的物理方程,比如连续方程和动量方程。

1. 连续方程

根据质量守恒定律,通过同一流管各横截面的质量流量必须相等,即满足

$$\rho_1 v_1 A_1 = \rho_2 v_2 A_2 = \rho_3 v_3 A_3 \quad (2-5)$$

式中, ρ, v, A 分别为密度、速度和流管横截面积;下标 1, 2, 3 分别代表不同的横截面。式(2-5)称为可压缩流体沿流管的连续方程。对于不可压缩流体, $\rho_1 = \rho_2 = \rho_3 = \text{常数}$,则式(2-5)变为

$$v_1 A_1 = v_2 A_2 = v_3 A_3 \quad (2-6)$$

由式(2-6)可知,对于不可压缩流体来讲,流管横截面积变小,平均流速必然增大;反之,流管横截面积变大,平均流速必然减小。对于可压缩流体,由式(2-5)可以看出,在流动过程中流体的密度会发生变化,因此速度的变化是很难直观地判别的。因此,可压缩流体的流动要比不可压缩的复杂得多。

2. 动量方程

微分形式的动量方程又名欧拉方程,或运动方程。欧拉方程是在不计流体黏性的前提下推导的。

设某流体的密度为 ρ , 中心点压强为 p , 中心点的彻体力的三个分量是 f_x, f_y, f_z , 这些都是单位质量的彻体力,它们也都是坐标的函数。再设微元的速度分量分别为 v_x, v_y, v_z , 则不计黏性的动量方程为

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial v_x}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_x}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_x}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + f_x \\ \frac{\partial v_y}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_y}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_y}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_y}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + f_y \\ \frac{\partial v_z}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_z}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_z}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + f_z \end{aligned} \right\} \quad (2-7)$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial p}{\partial x} &= \rho f_x - \rho \left[\frac{\partial v_x}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_x}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_x}{\partial z} \right] \\ \frac{\partial p}{\partial y} &= \rho f_y - \rho \left[\frac{\partial v_y}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_y}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_y}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_y}{\partial z} \right] \\ \frac{\partial p}{\partial z} &= \rho f_z - \rho \left[\frac{\partial v_z}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_z}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_z}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} \right] \end{aligned} \right\} \quad (2-8)$$

由式(2-8)可以看出流体中压强的变化取决于速度的变化和彻体力的存在,而且这两个使压强产生变化的因素是彼此独立的。

若流动是无旋的,那就有速度位 ϕ 存在。再假设彻体力有位 Ω ,即

$$\frac{\partial \Omega}{\partial x} = f_x \quad (2-9a)$$

$$\frac{\partial \Omega}{\partial y} = f_y \quad (2-9b)$$

$$\frac{\partial \Omega}{\partial z} = f_z \quad (2-9c)$$

则可得到积分形式的动量方程(无黏)。

(1) 对于不可压缩($\rho = \text{常数}$)的定常流 $\frac{\partial \phi}{\partial t} = 0$ 有

$$\frac{p}{\rho} + \frac{v^2}{2} + \Omega = C \quad (2-10)$$

(2) 对于气体,彻体力只限于重力的话,可略去,则有

$$p + \frac{\rho}{2} v^2 = C \quad (2-11)$$

这就是在低速气流中经常使用的伯努利公式。 p 是静压, $\frac{1}{2}\rho v^2$ 是动压, C 是总压,常写作 p_0 。式(2-10)可写为

$$p_0 = p + \frac{1}{2}\rho v^2 \quad (2-12)$$

值得提出的是, $\frac{1}{2}\rho v^2$ 被称为动压,在低速不可压缩流动中总压等于静压与动压之和。但在可压缩流动中总压计算公式为

$$p_0 = p \left(1 + \frac{\gamma-1}{2} Ma^2 \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \quad (2-11)$$

式中 Ma —— 当地马赫数;

γ —— 比热比,对空气通常 $\gamma = 1.4$ 。

可见,在可压缩流动中总压不等于动压与静压之和。

3. 伯努利方程的应用

1799年,文丘里·G·B(1746—1822年)在使用变截面直管道时,发现最小截面处的压强急剧下降,并可该处垂直旁管内的液体吸吮上升,以后人们称这种收缩-扩散变截面管道为文丘里管。1888年赫谢尔·C将文丘里管用于测量液体流量。这是不可压缩伯努利方程很典型的应用。

在低速风洞中为了控制实验段的风速常常采用落差法,这也是伯努利方程的典型应用。

首先在风洞标定时,在实验段安装标准风速管。在静流段(横截面积较大)取静压 p_1 ,在收缩段出口(横截面积较小)取静压 p_2 。由伯努利方程知 $p_1 > p_2$ 。根据标定时($p_1 - p_2$)与标准风速管测出实验段风速的对应关系,在实验中,只要控制了($p_1 - p_2$),就可以控制实验段的风速,不需要在实验段安装风速管,从而可以避免风速管对流场的干扰。

以上介绍的都是最基本的流体特性,希望初学者一定要牢固掌握。实际上流体流动还有许多重要的特性和规律,如可压缩流动、超声速流动等,限于篇幅这里就不再一一介绍。

思考题

1. 解释并深刻理解连续介质的概念以及流体压强、温度和密度的定义。
2. 流体的压缩性与声速的关系是怎样的?
3. 理解并牢记流体黏性、层流与紊流、边界层、分离等概念和特点。
4. 流动遵循的基本方程有哪些?