

21世纪高等教育规划教材

工程流体力学

李少华 郭婷婷 主编



西南交通大学出版社
[Http://press.swjtu.edu.cn](http://press.swjtu.edu.cn)

21 Shiji Gaodeng Jiaoyu Guihua Jiaocai
21 世纪高等教育规划教材

工程流体力学

Gongcheng Liuti Lixue

主编 李少华 郭婷婷



西南交通大学出版社

• 成 都 •

图书在版编目(CIP)数据

工程流体力学 / 李少华, 郭婷婷主编. —成都: 西南交通大学出版社, 2007. 11

21 世纪高等教育规划教材

ISBN 978-7-81104-415-7

I. 工… II. ①李…②郭… III. 工程力学: 一流体力学—高等学校—教材 IV. TB126

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 168259 号

21 世纪高等教育规划教材

工 程 流 体 力 学

主编 李少华 郭婷婷

*

责任编辑 张华敏

特邀编辑 李科亮 陈旭文

封面设计 水木时代

西南交通大学出版社出版发行

(成都市二环路北一段 111 号 邮政编码: 610031 发行部电话: 028-87600564)

<http://press.swjtu.edu.cn>

北京广达印刷有限公司印刷

*

成品尺寸: 145 mm × 209 mm 印张: 9.25

字数: 238 千字

2007 年 11 月第 1 版 2007 年 11 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-81104-415-7

定价: 19.80 元

版权所有 盗版必究 举报电话: 028-87600562

目 录

第 1 章 绪 论	(1)
1.1 工程流体力学的任务及其在工程中的应用	(1)
1.2 流体力学的发展简史	(4)
1.3 工程流体力学的研究方法	(6)
1.4 流体的定义与特征以及连续介质的概念	(8)
1.5 流体的主要物理性质	(10)
1.6 作用在流体上的力	(27)
本章小结	(28)
习 题	(31)
第 2 章 流体静力学	(35)
2.1 流体静压强及其特征	(35)
2.2 欧拉平衡微分方程及等压面	(40)
2.3 流体静力学基本方程式	(44)
2.4 压强的度量与测量	(48)
2.5 液体的相对平衡	(58)
2.6 静止液体作用在平面上的总压力	(60)
2.7 静止液体作用在曲面上的总压力	(66)
本章小结	(72)
习 题	(74)
第 3 章 理想流体动力学基础	(82)
3.1 研究流体运动的两种方法	(82)
3.2 流体运动的基本概念	(87)
3.3 流体运动的连续性方程	(98)
3.4 理想流体的运动方程	(105)

3.5	理想流体的伯努利方程	(107)
3.6	伯努利方程的应用	(111)
3.7	动量方程及其应用	(116)
	本章小结	(125)
	习 题	(129)
第4章	黏性流体动力学基础	(134)
4.1	黏性流体总流的伯努利方程	(134)
4.2	流动阻力与损失	(140)
4.3	实际流体的两种流动形态	(142)
4.4	流体的层流流动	(145)
4.5	流体的紊流流动	(149)
4.6	沿程阻力系数的实验研究	(157)
4.7	局部损失的计算	(162)
4.8	管路水力计算	(170)
4.9	孔口和管嘴出流	(175)
4.10	边界层理论概述	(179)
	本章小结	(189)
	习 题	(193)
第5章	有旋流动和有势流动	(201)
5.1	流体微团运动分解	(201)
5.2	有旋流动的基本概念	(206)
5.3	有旋流动的基本定理	(209)
5.4	速度势函数和流函数	(214)
5.5	基本的平面有势流动	(220)
5.6	平面势流运动的叠加	(226)
5.7	平行流绕过圆柱体的流动	(230)
5.8	平面叶栅绕流简述	(236)
	本章小结	(240)
	习 题	(246)

第 6 章 气体动力学基础	(248)
6.1 声速与马赫(Mach)数	(248)
6.2 微弱扰动在可压缩流体中的传播	(252)
6.3 气体的一维定常等熵流动	(256)
6.4 截面面积变化的管流	(263)
6.5 正激波	(273)
本章小结	(280)
习 题	(283)
参考文献	(285)

第1章 绪 论

1.1 工程流体力学的任务 及其在工程中的应用

工程流体力学是研究流体(液体、气体)处于平衡状态和流动状态时的运动规律及其在工程技术领域中应用的一门基础学科,是力学的一个重要分支。流体的流动概括起来主要有三种形式:一是管流,如流体在管道和明渠中的流动;二是绕流,如流体在流体机械中绕过翼型的流动;三是射流,如流体从孔口或管嘴喷出的流动。流体力学就是研究流体流动形式中的速度分布、压力分布、能量损失,以及流体同固体之间的相互作用,同时也要研究流体平衡的条件。

流体力学在工程技术中有着广泛的应用。如水利工程中的农田水利、水力发电、水工建筑及施工、机电排灌等方面都与水的运动有关,都需要应用工程流体力学解决与水的运动规律相关的生产技术问题;在电力工业中,不论是水电站、热电站、还是核电站、地热电站,其生产运行的工作介质都是水、气和油等流体,所有动力设备的设计与运行都必须符合流体运动规律;在航空航天工业中,飞机、火箭与导弹等各种飞行器的运行环境都在大气中,这些飞行器的设计与运行都必须符合空气动力学的基本原理;在机械工业中,润滑、冷却、液压传动以及液压与气体控制等问题都需应用流体力学的原理加以解决;土木工程中的给水排水、暖通空调等行业,各种设施和设备都与水、气体等流体流动有关,在设计和施工中需充分利用流体力学的基本原理;石油、化工中的渗流、抽吸,

海洋中的波浪、环流、潮汐与大气中的气旋、季风等都是流体力学问题,都需要根据流体力学的基本原理进行研究和解决。人体的血液循环系统、呼吸系统也是流体系统,所以像人工心脏、心肺机助呼吸器等的设计都要依据流体力学的基本原理。由此可见,流体力学是一门重要的学科。

工程流体力学在热力发电厂中有着重要的作用。热力发电厂的生产过程就是能量转换的过程,这一过程可简单表示为:燃料的化学能—蒸汽的热能(锅炉)—转动的机械能(汽轮机)—电能(发电机)。这种能量转换的生产过程,需要许多循环系统密切合作才能实现。能量转换过程中,流体是必不可少的中间载体。由管路组成的循环系统中,流动着的水、汽、油、空气、烟气等都是流体。循环系统是由泵或风机作为动力驱使某种流体在其中往复流动的管路系统。走进发电厂的厂房,可以看到许多不同颜色的管路交错密布在一起,不同颜色的管路中流动的是不同种类的流体。

汽包中的饱和蒸汽经过过热器进一步被加热成为过热蒸汽,过热蒸汽被送至汽轮机中膨胀做功。高速汽流冲动汽轮机转子并带动发电机一起旋转,利用导体切割磁力线产生感应电流发出电能。汽轮机的排汽进入凝汽器凝结,凝结水经过凝结水泵后进入除盐装置,再经升压泵依次送到低压加热器中加热,然后进入除氧器除氧,经除氧后的水由给水完成整个汽、水循环。为迅速凝结汽轮机排出的乏汽,循环水泵向凝汽器输送大量的冷却水,并排向冷却水塔;为排除凝汽器内的空气,装设有射水泵和射水抽气器;为排除疏水,装设有疏水泵;为补充汽、水损失,装设有补给水泵、生水泵、生水预热器、化学水处理设备;为排除锅炉制粉系统燃烧后产生的灰渣,装设有灰渣泵和冲灰水泵。此外,还有供给汽轮机用油的油泵和供各泵与风机轴承冷却水、冷油器等用水的工业水泵。由送风机向锅炉输送燃料燃烧所需的空气,空气经空气预热器后,一部分热风(一次风)经

由磨煤机和排粉风机将磨制好的煤粉送至炉膛,另一部分(二次风)直接送至炉膛助燃。燃烧生成的烟气经过除尘器除尘,由引风机将烟气送入烟囱并排入大气。

在热电厂中,正是用各管路系统连接着各种不同的设备装置,在连续不断的循环过程中完成能量的转换,生产出电能的。图1-1是热力发电厂生产过程示意简图。

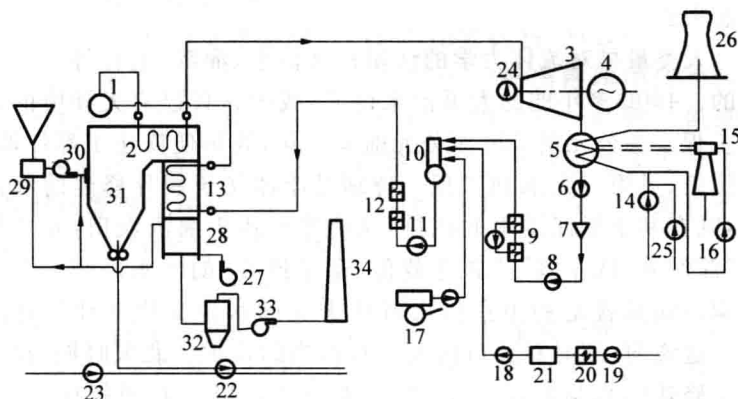


图 1-1 热力发电厂生产过程示意简图

- 1—汽包;2—过热器;3—汽轮机;4—发电机;5—凝汽器;6—凝结水泵;7—除盐装置;
 8—升压泵;9—低压加热器;10—除氧器;11—给水泵;12—高压加热器;
 13—省煤器;14—循环水泵;15—射水抽气器;16—射水泵;17—疏水泵;
 18—补给水泵;19—生水;20—生水预热器;21—化学水处理设备;
 22—灰渣泵;23—冲灰水泵;24—油泵;25—工业水泵;
 26—冷却水塔;27—送风机;28—空气预热器;
 29—磨煤机;30—排粉风机;31—炉膛;
 32—除尘器;33—引风机;34—烟囱

从以上的简单介绍可以看出,各管路系统中,流动的大都是不同种类的流体,无论是锅炉中的空气、烟气,还是汽轮机中的蒸汽以及给水、冷却水、润滑油等,都在不停地运动,它们的运动规律都是工程流体力学这门课程的内容。

1.2 流体力学的发展简史

流体力学作为一门独立的学科,同其他自然科学一样,是人类为了满足自身生活和生产的需要,在认识与改造自然的斗争中,随着实践经验的不断积累,技术与知识水平的不断提高才形成和发展起来的。

人类最早对流体力学的认识是从治水、灌溉、航行等方面开始的。4000 多年前的大禹治水说明,我国古代已有大规模的治河工程。在公元前 256 至公元前 210 年,我国便修建了都江堰、郑国渠、灵渠三大水利工程。特别是李冰父子领导修建的都江堰,既有利于岷江洪水的疏排,又能常年用于灌溉农田,并总结出“深淘滩,低作堰”、“遇弯截角,逢正抽心”的治水原则。古代的铜壶滴漏就是利用孔口出流使铜壶的水位变化来计算时间的。这说明,那时对孔口出流已有相当的认识。北宋时期,在汤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。明朝的水利学家潘季顺(1521—1595)提出了“筑堤防溢,建坝减水,以堤束水,以水攻沙”和“借清刷黄”的治黄原则,并著有《两河管见》、《两河经略》和《河防一揽》。以上都说明了我国劳动人民的聪明智慧,当时对流体流动规律的认识已达到相当高的水平。

公元前 250 年,希腊数学家及力学家阿基米德(Archimedes)发表了一篇“论浮体”的论文,提出了浮体定律,这是流体力学的第一部著作。他第一个阐明了相对密度的概念,发现了各种不同的物体有不同的比重,并证明了任何一种液体的液面,在静止时与地球表面呈同一曲面,此曲面的中心即地心。他的这些著名论断至今还是流体静力学的重要基础,但由于奴隶制、神权和宗教观念的束缚,直到 15 世纪文艺复兴时期,仍未形成系统的理论。

16 世纪以后,在欧洲,资本主义开始萌芽,生产力有了发展。在城市建设、航海和机械工业发展需要的推动下,逐步形成近代的自然科学,流体力学也随之得到发展。意大利的达·芬奇倡导用实验的方法了解水流型态,在米兰附近设计建造了一个小水渠,系统地研究了沉浮、孔口出流、物体的运动阻力等问题,促进了这一时期水力学和流体力学的发展。1612 年伽利略(Galilei)提出了潜体的沉浮原理;1643 年托里拆利(Torricelli)给出了孔口泄流的公式;1650 年帕斯卡(Pascal)提出液体中压力传递的定理;1686 年牛顿(Newton)发表了《自然哲学的数学原理》,对普通流体的黏性作了描述,即黏性切应力与速度梯度成正比(牛顿内摩擦定律)。为了纪念牛顿,将黏性切应力与速度梯度成正比的流体称为牛顿流体。

18 世纪~19 世纪,流体力学得到了较大的发展,成为独立的一门学科。古典流体力学的奠基人是瑞士数学家伯努利(Bernoulli)和他的亲密朋友欧拉(Euler)。1738 年,伯努利在其名著《流体动力学》一书中最早引用流体力学的名字,该书中首先建立了流体位置高度、压强和动能之间的普遍关系——伯努利方程。欧拉于 1755 年在其《流体运动的一般原理》一书中提出了速度势的概念,建立了连续性方程和理想流体的运动微分方程,并将其应用于人体的血液流动;他在《航海科学》、《船舶制造和结构全论》与《论船舶的左右及前后摇晃》等著作中,系统地论述了船型、船的平衡、船的摇晃、风力作用下的运动等问题。以后纳维(Navier)和斯托克斯(Stokes)建立了黏性流体运动微分方程。格拉朗日(Lagrange)在前人的基础上进一步发展了流体力学的解析方法,严格地论证了速度势的存在,并提出了流函数的概念,运用这些概念可将复杂的流体力学问题转化为纯数学问题。法国学者达朗伯(D'Alembert)于 1744 年提出了达朗伯疑题,即在理想流体的假定下,在流体中运动的物体既没有升力也没有阻力,从反面说明了理想流体假定的局限性。

随着人类社会的进步和生产力的发展,大大加速了“流体力

学”和“水力学”的发展,同时由于数学、实验手段的进步和实际工程问题的需要加速了两者结合的进程,使两者逐渐结合起来,在这一过程中量纲分析和相似原理起了重要作用。

19 世纪末~20 世纪初,众多学者对流体力学也作出了重要的贡献。1883 年,雷诺(Reynolds)用不同直径的圆管进行实验,研究了黏性流体的流动,提出了黏性流体存在层流和紊流两种流态,并给出了流态的判别准则——雷诺数。12 年后,他又引进紊流(或雷诺)应力的概念,并用时均方法,建立了不可压缩流体做紊流运动时所应满足的方程组,雷诺的研究为紊流的理论研究奠定了基础。1904 年,普朗特(Prandtl)提出了边界层理论,解释了阻力产生的机制,并将势流理论和黏性流体理论建立了联系,随着边界层理论的完善和近代实验技术的进步,已经形成一个独立的流体力学分支。库塔、儒可夫斯基建立的翼形绕流理论,解释了升力和环流的关系,奠定了空气动力学的基础。我国科学家钱学森在空气动力学方面的新理论、周培源的紊流理论、吴仲华的三元流理论也为世人所瞩目。

20 世纪中叶以后,流体力学所研究的问题更加广泛深入,和其他学科相互渗透,派生出许多分支,形成许多边缘学科,如电磁流体力学、化学流体力学、生物流体力学、地球流体力学、高温气体动力学、非牛顿流体力学、爆炸力学、流变学、计算流体力学等。这些新兴学科的出现和发展,使流体力学这一古老的学科焕发出新的生机和活力。

1.3 工程流体力学的研究方法

工程流体力学作为一门学科,在它的发展过程中产生了一些特殊的研究和解决问题的方法,掌握这些方法,对于获得工程流体力学方面的知识和能力等方面,都是很重要的。研究工程流体力学问题有实验测量、理论分析和数值计算三种方法。

1.3.1 实验测量方法

工程流体力学的研究,离不开科学实验。流体力学理论的发展,在相当程度上取决于实验测量水平,工程流体力学的实验方法主要有以下四个方面:

(1)原型观测。对工程中的实际流体运动直接进行观测,收集、整理数据,为检验理论分析或总结基本规律提供依据。

(2)模型实验。在实验室内,以相似理论为指导,把实际工程中原型物体缩小或放大为模型,在模型上预演相应的流体运动,得出在模型中的流体运动规律,并按照相似理论换算为原型的结果。

(3)系统实验。如果原型观测受到某些条件的局限或因流体运动的相似规律在理论上没有建立,则可在实验室内小规模地造成某种流体运动,以此进行系统的实验观测,从中找出规律性。

(4)模拟实验。根据水流或电流的相似或水流与气流的相似等性质,进行电模拟或水、气比拟实验等。

以上几方面各有特点,在实验研究中起着不同的作用,在一定范围内,可以相互配合、补充与验证。

1.3.2 理论分析方法

理论分析方法是在连续介质假设的基础上,对流动现象进行物理观点的描述,将实际流体流动抽象为工程流体力学模型——物理模型,根据机械运动的普遍规律和物体的物性,结合流体流动的特点,通过数理分析建立流体运动的基本方程——数学模型,利用各种数学工具解出方程并对它的解进行分析。

但是,由于流体流动的复杂性,单纯依靠由数学分析得到的分析解很难解决工程实际问题,因此,需要采用理论分析与实验研究相结合的方法。工程流体力学中用理论解决实际问题有以下几种情况:①先推导理论公式再用经验系数加以修正;②根据实验现象与理论推理提出半经验公式;③先进行定性分析,然后直接给出经验公式。

1.3.3 数值计算方法

还有相当多的流动问题,若仅仅依靠理论分析与各类实验还是不能满足生产实践的要求,可以通过数值计算的方法实现。随着计算机技术及其应用的飞速发展,这一方面已形成流体力学的一个重要分支——计算流体力学。

数值模拟的计算步骤如下:

(1)对需要模拟计算的工程实际问题,运用描述流体流动的基本方程和具体的初始条件和边界条件建立数学模型,组成这些数学模型的方程是偏微分方程。

(2)采用不同的方法,如有限差分、有限元、有限容积、有限分析以及谱方法等,对数学模型进行离散。

(3)利用计算机和相应的数值计算方法对流动进行模拟显示,重复或再现复杂的流动现象,从而得到问题的解。

实验测量、理论分析和数值模拟这三种方法各有利弊,实验可检测理论分析和数值计算结果的正确性与可靠性,并为简化理论模型和建立运动规律提供依据,这是其他方法无法替代的。理论分析则能指导实验和数值计算,并可把部分实验结果推广到一整类没有做过实验的现象中。数值计算可对一系列复杂流动进行重复性的模拟,节约时间。这三种方法互相补充,对于一些重要工程流体力学问题的研究,还要采用三种方法相结合的途径。

1.4 流体的定义与特征以及连续介质的概念

1.4.1 流体的定义及特征

自然界中的物体以三种状态存在,即固体、液体和气体。气体

和液体都具有流动性,统称为流体。从力学角度来讲,在任何微小剪切力的持续作用下能够连续不断变形的物质称为流体。只要这种剪切力存在,变形就不会停止。流体中除了液体与气体之外,等离子体、熔化的金属也属于流体。固体具有一定的形状和体积,液体也具有一定的体积,但没有固定的形状,容易流动,其形状随盛装容器的形状而改变,并能形成与气体分界的自由表面,气体则是既没有一定的体积也没有一定的形状,并且很容易被压缩。固体分子间距离很小,分子间作用力很大,不易发生变形。液体分子间距远小于气体的分子间距,当液体受压时,只要分子间距稍有变小,则分子间的排斥力就会增大以抵抗所施加的压力,使得液体的分子间距很难再变小,也就是液体不易被压缩。

1.4.2 流体连续介质假设

从微观角度来看,流体内部的质量分布存在着不连续与不均匀分布的情况,反映流体状况的物理量也会因为分子的随机运动在空间与时间上呈现不连续的情况。工程流体力学是一门研究流体宏观运动特性与规律的学科。从宏观角度来看,对于一些实际问题,如各种设备、管道等的特征尺寸,往往远大于流体的分子距与分子自由程;这些实际工程的时间尺度,远大于分子运动的时间尺度;反映这些宏观运动状态的物理量实际是大量分子的运动所贡献的,是大量分子的统计平均值。因此,欧拉在1753年提出了以连续介质的概念为基础的研究方法,该方法在流体力学的发展上起了巨大作用。因此,在流体力学中,取流体微团来作为研究流体的基元。所谓流体微团是一块体积为无穷小的微量流体,由于流体微团的尺寸极其微小,故可作为流体质点看待。这样,流体可看成是由无限多连续分布的流体微团组成的连续介质。

流体的连续介质假设是合理的,因为在流体介质内含有为数众多的分子。例如,在标准状态下, 1 mm^3 气体中有 2.7×10^{16} 个分子; 1 mm^3 的液体中有 3×10^{19} 个分子。可见,分子间的间隙是

极其微小的,因此,在研究流体宏观运动时,可以忽略分子间的间隙,而认为流体是连续介质。

流体的连续介质假设是必要的。连续介质假设认为流体质点是连续而不间断地紧密排列的,那么表征流体特性的各物理量的变化,在时间与空间上是连续变化的。也就是说,这些物理量是空间坐标与时间的单值连续函数。因此,可以利用以连续函数为基础的高等数学来解决工程流体力学的问题。

需要指出的是,流体连续介质的概念对大部分工程实际问题都是正确的,但对某些问题却不适用。如果所研究问题的特征尺度接近或小于分子的自由程,连续介质的概念将不再适用。如在高空飞行的火箭、导弹,由于空气稀薄,分子的间距很大,可以与物体的特征尺度相比拟,虽然能找到可获得稳定平均值的分子团,显然这个分子团是不能当做质点的。

1.5 流体的主要物理性质

1.5.1 流体的密度

1. 流体的密度

流体的密度是流体的重要属性之一,它表征流体在空间某点质量的密集程度,流体的密度定义为:单位体积流体所具有的质量,用符号 ρ 来表示。

对于流体中各点密度相同的均质流体,其密度

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1-1)$$

式中 ρ ——流体的密度, kg/m^3 ;

m ——流体的质量, kg ;

V ——流体的体积, m^3 。

对于各点密度不同的非均质流体,在流体的空间中某点取包含该点的微小体积 ΔV ,该体积内流体的质量为 Δm ,则该点的密度为

$$\rho = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta m}{\Delta V} = \frac{dm}{dV} \quad (1-2)$$

式中, $\Delta V \rightarrow 0$ 并不是数学意义上的趋向于一个点,而是趋向于一个微团的体积,这一微团必须包含有足够多的流体分子,使得这些分子的共同物理属性的统计平均值有意义。

对于一定质量的流体,密度的大小与体积有关,而体积与温度、压强有关,所以,流体的密度受温度和压强的影响。表 1-1 列出了一些常用液体在标准大气压下的物理性质。表 1-2 列出了一些常用气体在标准大气压和 20 °C 下的物理性质。

表 1-1 在标准大气压下常用液体的物理性质

液体种类	温度 t (°C)	密度 ρ (kg/m ³)	相对密度 d	动力黏度 $\mu \times 10^4$ (Pa · s)
纯水	20	998	1.00	10.1
海水	20	1 026	1.03	10.6
20%盐水	20	1 149	1.15	
乙醇(酒精)	20	789	0.79	11.6
苯	20	895	0.90	6.5
四氯化碳	20	1 588	1.59	9.7
氟利昂-12	20	1 335	1.34	
甘油	20	1 258	1.26	14 900
汽油	20	678	0.68	2.9
煤油	20	808	0.81	19.2
原油	20	850~958	0.85~0.93	72
润滑油	20	918	0.92	
氢	-257	72	0.072	0.21
氧	-195	1 206	1.21	2.8
水银	20	13 555	13.58	15.6