



高等院校“十一·五”规划教材

流体力学

杜 扬 主编

中国石化出版社

[HTTP://WWW.SINOPEC-PRESS.COM](http://www.sinopec-press.com)

高等院校“十一五”规划教材

流体力学

杜扬 主编

ISBN 978-7-80259-103-9

中国版本图书馆CIP数据核字(2008)第138430号

中国石化出版社
地址：北京市东城区广渠门内大街16号
邮编：100011 电话：(010)845371830
传真：(010)84539374
E-mail: chinapetroleum@sinopetroleum.com.cn
http://www.sinopetroleum.com.cn

中国石化出版社

2008年8月第1版 2008年8月第1次印刷
787×1092 1/32 13.2印张 323千字
定价：48.00元

内 容 提 要

全书共分十三章,包括:绪论;流体静力学;流体动力学的理论基础;相似原理与量纲分析;流动阻力及能量损失;管路流动及孔口、管嘴出流;气体射流;不可压缩流体运动学;不可压缩流体动力学基础;明渠恒定流;堰流及闸孔出流;渗流;一元气体动力学基础。其中,流体静力学与动力学理论及其工程应用、流动阻力和能量损失、有压管流的计算、气体射流和明渠恒定流动是本书的重点。本书还精选了一定数量的习题。

本书除了作为高等学校石油天然气各专业、油气储运工程、暖通空调、土木工程、给水排水工程、环境工程、市政工程、建筑环境与设备等专业流体力学课程的教学用书外,还可作为其他相近专业的教学以及有关工程技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

流体力学/杜扬主编. —北京:中国石化出版社,2008
高等院校“十一五”规划教材
ISBN 978-7-80229-703-6

I. 流… II. 杜… III. 流体力学-高等学校-教材
IV. O35

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 128430 号

中国石化出版社出版发行

地址:北京市东城区安定门外大街 58 号

邮编:100011 电话:(010)84271850

读者服务部电话:(010)84289974

<http://www.sinopec-press.com>

E-mail:press@sinopec.com.cn

金圣才文化(北京)发展有限公司排版

北京宏伟双华印刷有限公司印刷

全国各地新华书店经销

*

787×1092 毫米 16 开本 21.75 印张 535 千字

2008 年 8 月第 1 版 2008 年 8 月第 1 次印刷

定价:48.00 元

编写人员名单

主 编：杜 扬

副 主 编：唐晓寅 蒋新生

参编人员：李康宁 王 冬 周琳莉

前 言

现代学科发展的显著特点之一就是综合交叉。表现在针对工学学科流体力学教学的教材上就是需要涵盖内容较广的教材。本书和国内外同类教材相比,具有以下特点:

(1) 涵盖内容较广。既方便教师根据不同专业、不同学时进行教学,又方便学生根据课程学习和知识拓展的学习;

(2) 根据多年多专业教学的经验,突破以往油品类、建筑类、热能动力类等一般使用不同版本教材的限制,将不同类教材体系融入一个体系。既打破专业界限,又解决目前有些专业要同时使用两本教材才能满足学习需要的难题,减轻学生负担;

(3) 本书注重理论联系实际,注重知识应用和工程设计能力培养。根据流体力学理论性强、力学概念多,涉及的数学知识多的特点,在编写时一方面更注重物理意义和工程背景的讲解,另一方面注重理论和实践相结合,在内容安排上对理论性强且超出基本要求的内容作了一定压缩,增加工程应用方面一定量的内容、例题和习题等;

(4) 更加注重最新科技的进步。在内容上,加入有关流体力学的最新成果,尤其是最新的工程技术、实验手段与成果、分析计算方法和手段。例如,增加了流体的温变特性、给出了常用油品黏温特性三参数指数公式的计算系数和相对密度随温度变化的高精度计算公式等。

该书除了作为高等院校石油天然气各专业、油气储运工程、暖通空调、土木工程、给排水工程、环境工程、市政工程、建筑环境与设备等专业流体力学课程的教学用书外,还可作为其他相近专业的教学以及有关工程技术人员工作的参考书。

全书共分13章,内容包括流体力学基础理论、知识拓展与专题应用三大部分。常用的常见流体的密度、各种管件的当量长度和局部阻力系数、常用管材规格、部分渠道与河道的糙率 n 值、渠道的不冲允许流速 v 及中外人名对照详见附录。流体力学是一门学习与应用难度都较大的课程。但是只要仔细阅读、勤于思考、多加练习与实践,就能掌握流体力学理论知识要点并具备应用流体力学知识解决实际工程技术问题的能力。

本书由杜扬、唐晓寅、蒋新生、李康宁、王冬、周琳莉共同编写。其中,杜扬编写第5、第7章,唐晓寅编写第6、第13章,蒋新生编写第3、第12章,李康宁编写第1、第10章,王冬编写第8、第9、第11章,周琳莉编写第2、第4章。李康宁对全部稿件、插图、附录等进行了梳理、整合。全书由杜扬主编,杨小凤教授主审。

中国石化出版社对本书出版给予了大力支持,在此表示衷心感谢!

由于编者水平有限,难免有不当和错漏,恳请读者批评指正。

编 者

目 录

第1章 绪论	(1)
1.1 流体力学的基本任务、研究方法与发展简史	(1)
1.2 流体	(5)
1.3 流体的主要物理性质	(6)
1.4 液体的表面张力与毛细现象	(16)
1.5 流体的热力学性质	(17)
1.6 作用在流体上的力	(19)
习题	(20)
第2章 流体静力学	(22)
2.1 流体静压强及其特性	(22)
2.2 流体平衡微分方程及其积分	(23)
2.3 流体静压强分布规律	(26)
2.4 流体静压强的测量	(30)
2.5 作用在平面上的液体总压力	(34)
2.6 作用在曲面上的流体总压力	(40)
2.7 液体的相对平衡	(44)
2.8 浮力与浮体的稳定性	(48)
习题	(50)
第3章 流体动力学的理论基础	(55)
3.1 研究流体运动的两种方法及有关概念	(56)
3.2 系统和控制体的概念	(62)
3.3 恒定总流的连续性方程	(63)
3.4 不可压缩实际流体恒定总流的伯努利方程	(64)
3.5 恒定总流的动量方程和动量矩方程	(72)
习题	(75)
第4章 相似原理和量纲分析	(80)
4.1 相似原理	(80)
4.2 相似准则	(83)
4.3 模型设计	(86)
4.4 量纲分析	(91)
习题	(97)
第5章 管流阻力及能量损失	(99)
5.1 管流阻力及能量损失的分类	(99)

5.2	流体的两种流动形态及其判据	(101)
5.3	管流切应力与沿程损失关系的基本方程	(104)
5.4	圆管中的层流运动	(105)
5.5	圆管中的紊流运动	(109)
5.6	管流沿程摩阻系数的实验研究	(116)
5.7	局部阻力及局部损失	(127)
	习题	(131)
第6章	管路流动及孔口、管嘴出流	(134)
6.1	概述	(134)
6.2	简单管路的水力计算	(137)
6.3	简单管路的设计计算举例	(140)
6.4	复杂管路的水力计算	(143)
6.5	管网	(146)
6.6	孔口及管嘴出流	(148)
6.7	有压管路的水击	(153)
	习题	(158)
第7章	气体射流	(161)
7.1	无限空间淹没紊流射流的特征	(161)
7.2	圆断面射流的运动分析	(165)
7.3	平面射流	(169)
7.4	温差射流与浓差射流	(170)
7.5*	旋转射流	(175)
7.6	有限空间射流简介	(179)
	习题	(182)
第8章	不可压缩流体运动学	(184)
8.1	流体微团的运动分析(速度分解定理)	(184)
8.2	三维流动连续性微分方程	(187)
8.3	有旋流动	(188)
8.4	无旋流动	(192)
8.5	平面流动及流函数	(194)
8.6	简单平面势流及其叠加	(196)
	习题	(203)
第9章	不可压缩流体动力学基础	(205)
9.1	黏性流体中的应力分析	(205)
9.2	理想流体的欧拉运动方程及其积分	(207)
9.3	不可压缩黏性流体的运动微分方程(N-S方程)	(210)
9.4	边界层基本概念及特征	(216)

9.5	边界层动量方程	(218)
9.6*	平板层流边界层的计算	(221)
9.7*	平板紊流边界层的近似计算	(223)
9.8	曲面边界层积分分离现象	(226)
9.9	绕流阻力、阻力系数	(228)
9.10	绕圆柱体的流动、卡门涡街	(230)
	习题	(233)
第10章	明渠恒定流动	(235)
10.1	明渠的分类	(235)
10.2	明渠均匀流的特性及基本计算公式	(236)
10.3	水力最优断面与允许流速	(238)
10.4	明渠均匀流的水力计算	(240)
10.5	无压圆管及复式断面明渠均匀流的水力计算	(242)
10.6	明渠恒定非均匀流的流态及其判别	(246)
10.7	明渠恒定非均匀流的基本概念	(248)
10.8	水跃与跌水	(254)
10.9	明渠恒定渐变流的基本微分方程	(259)
10.10	棱柱形渠道中恒定渐变流水面曲线分析	(261)
10.11	棱柱形渠道恒定渐变流水面曲线的计算	(266)
10.12*	天然河道水面曲线的计算	(268)
	习题	(270)
第11章	堰流及闸孔出流	(272)
11.1	堰流及其分类	(272)
11.2	堰流的基本公式	(273)
11.3	薄壁堰	(275)
11.4	实用堰流	(277)
11.5	宽顶堰流	(278)
11.6	小桥孔径水力计算	(281)
11.7	闸孔出流	(285)
11.8	消力池水力计算	(290)
	习题	(292)
第12章	渗流	(294)
12.1	渗流基本概念	(294)
12.2	渗流基本定律	(295)
12.3	地下水的均匀流与非均匀渐变流	(297)
12.4	集水廊道、井和圆柱基坑的渗流计算	(303)
12.5	井群	(307)
12.6	恒定渗流的微分方程及其解法	(309)

习题	(310)
第 13 章 一元气体动力学基础	(313)
13.1 音速与马赫数	(313)
13.2 气体一元恒定流动基本方程	(316)
13.3 一元恒定等熵气流的基本特性	(319)
13.4 气流参数与通道面积的关系	(324)
13.5 管道中实际气体的等温流动	(325)
13.6 管道中有摩擦气体的绝热流动	(327)
习题	(331)
附录	(332)
参考文献	(340)

第1章 绪 论

1.1 流体力学的基本任务、研究方法与发展简史

流体力学是研究流体平衡和运动规律及其在工程实践中应用的一门科学，是力学的一个重要分支。流体包括液体和气体，因此，流体力学的研究对象为液体和气体。

1.1.1 流体力学的基本任务

流体力学的基本任务在于建立描述流体运动的基本方程，确定流体经各种通道(如管道)及绕流不同物体时速度、压强的分布规律，探求能量转换及各种损失的计算方法，并解决流体与限制其流动的固体壁之间的相互作用问题。

在实际工程的许多领域里，流体力学一直起着十分重要的作用，并得到广泛的应用。在石油化工、土木工程、环境保护、城市给排水、水利水电工程中，要涉及大量的流体力学问题。如管网的设计计算、管道直径的确定、泵的选择与安装、泵站位置确定、管道水击现象的分析与控制、储液罐的设计以及管道的运行与管理，都必须依据流体力学的基本原理进行分析与计算。

在机械工业中，如水轮机、燃气轮机、蒸汽轮机、喷气发动机、液体燃料火箭、内燃机等都是以流体能量为原动力的动力机械；水压机、水泵、油泵、风扇、通风机、压缩机都是以流体为工作对象的流体机械，如此等等。它们的工作原理、性能、使用和实验都是以流体力学为理论基础的。

在其他工程领域，如航空航天、航海、天文气象、食品、化工、消防、冶金采矿、生物、大气、海洋、军工核能等部门，都有许多流体力学的应用问题。因此流体力学是一门应用极为广泛的科学，它也是一门工程类许多相关专业的核心技术基础课程。

1.1.2 流体力学的研究方法

作为一门技术基础课程，流体力学主要讲述流体力学的基本概念、基本理论以及基本应用。作为一门技术科学，流体力学的研究方法也遵循“实践—理论—实践”的基本规律。其研究方法大致可以归纳为以下四个过程：

- ① 对自然界和生产实践中出现的流体力学现象进行观察、研究，从中找出共性作为研究课题；
- ② 建立模型，对自然现象和实践问题进行研究、认识，从中找出主要因素，忽略次要因素，建立抽象的数学模型；
- ③ 对数学模型进行理论分析和实验研究，总结并验证基本规律，形成理论；
- ④ 以得到的基本理论去指导实践，并在实践中检验、修正理论使其逐步完善。

1.1.3 流体力学的发展简史

流体力学是人类在长期与自然灾害作斗争的过程中逐步认识和掌握自然规律，逐渐发展形成的，是人类集体智慧的结晶。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。秦代，在公元前

256 ~ 前 210 年间便修建了都江堰、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。说明当时对明槽水流和堰流流动规律的认识已经达到相当水平。西汉武帝(公元前 156 ~ 前 87)时期,为引洛水灌溉农田,在黄土高原上修建了龙首渠,创造性地采用了井渠法,即用竖井沟通长十余里的穿山隧洞,有效地防止了黄土的塌方。北宋(960 ~ 1127)时期,在运河上修建的真州船闸与十四世纪末荷兰的同类船闸相比,约早三百多年。明朝的水利家潘季顺(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》。清朝雍正年间,何梦瑶在《算迪》一书中提出流量等于过水断面面积乘以断面平均流速的计算方法。这些工程标志着我国古代经济、文化的繁荣和科学技术的进步。而欧洲最早的水利工程是古罗马水道,它是公元 100 年前后古罗马统治者为供应生活用水而建造的。但在我国,据最近河南出土文物表明早在 2000 多年前就有着大型的供水管道,比欧洲早几百年。此外,我国古代的造船、航海技术也走在世界的前列。在水力学、水文、水力机械上,我国古代也是领先的。早在秦汉时代就不断改进水磨、水车和水力鼓风设备,汉代张衡发明了水力带动的浑天仪。还有我国早已根据铜壶滴漏的孔口泄流原理而发明了水钟。以上这些充分说明了我国古代对水流的性质及其规律已有充分地认识。但由于长期的封建统治,生产力得不到发展,加上历代都是重视文学,轻视科学,使得我国的科学长期停留在经验的形式上,未能形成系统的理论,流体力学也不例外。而流体力学理论,是从西欧发展起来的。其发展可划分为四个阶段:

(1) 准备阶段

早在公元前 250 年,古希腊学者阿基米德(Archimedes, 公元前 287 ~ 公元前 212)在公元前 250 年发表学术论文《论浮体》,第一个阐明了相对密度的概念,发现了物体在流体中所受浮力的基本原理——阿基米德原理。它不但是流体力学的一条重要定律,而且也为物理学的产生奠定了基础。他的学生克特集曾发明水泵、气枪和抽水唧筒。克特集比的学生赫伦发明过救火水泵和虹吸管。这是古希腊人对于流体力学所做的贡献。文艺复兴时期时意大利的达·芬奇(Leonardo. da. Vinci, 1452 ~ 1519)不仅是位伟大的画家,而且也是水力学的奠基人。他在米兰附近设计并建造了第一座大型水闸,从而进入了水力工程的时代。此外他还研究鸟类的飞行并发展了一些关于飞鸟受力的思想。他还做了大量的水力学试验,如射流、旋涡形成、水跃和连续性原理等,系统地研究了物体的沉浮、孔口出流、物体的运动阻力以及管道、明渠中水流等问题。为近代流体力学的诞生奠定了基础。进入十七世纪,产业革命爆发,流体力学随之得到发展。托里折利(E. Torricelli, 法国人, 1608 ~ 1647)于 1643 年提出孔口泄流定律和著名的大气压强试验。帕斯卡(B. Pascal, 法国人, 1623 ~ 1662)于 1650 年提出压强传递原理。科学巨人牛顿(I. Newton, 1642 ~ 1727)于 1687 年出版了《自然哲学的数学原理》,书中对物体在阻尼介质中的运动进行了研究,并建立了流体摩擦定律,为黏性流体力学初步奠定了理论基础,并讨论了波浪运动等问题。

(2) 创立阶段

到了十八世纪,第一次技术革命(蒸汽机)给近代自然科学的发展带来了黎明,流体力学也伴随其他科学有了较大的发展,并形成独立的学科。流体力学奠基人的是瑞士数学家伯努利(D. Bernoulli, 1700 ~ 1782)在 1738 年出版的名著《流体动力学》中,建立了流体位势能、

压强势能和动能之间的能量转换关系——伯努利方程。在此历史阶段,诸学者的工作奠定了流体静力学的基础,促进了流体动力学的发展。

欧拉(L. Euler, 1707 ~ 1783)是经典流体力学的奠基人,1755年发表《流体运动的一般原理》,提出了流体的连续介质模型,建立了流体平衡微分方程、连续性微分方程和理想流体的运动微分方程,并推证了伯努利积分,给出了不可压缩理想流体运动的一般解析方法。他提出了研究流体运动的两种不同方法及速度势的概念,并论证了速度势应当满足的运动条件和方程。另外针对流体运动会产生摩擦阻力的现象,法国数学家达朗伯(J. LeR. d' Alembert, 1717 ~ 1783)于1744年提出“理想流动没有运动阻力”的著名假说,但此假说与实际有出入,他还提出达兰伯原理,于是科学家和工程师又试图从实验的角度来解决流体力学的问题,这样又出现了一个新的分支——水力学。以后,它们在各自的道路上得到了新的发展。此时还有法国数学家拉格朗日(J. L. Lagrange, 1736 ~ 1813)提出了新的流体动力学微分方程,使流体动力学的解析方法有了进一步发展。严格地论证了速度势的存在,并提出了流函数的概念,为应用复变函数去解析流体定常的和非定常的平面无旋运动开辟了道路。此外他还确立了波动的基本微分方程和波速传播方式。至此理论流体力学形成,它主要是从数学解析的方法来试图解决流体力学的问题。

(3) 发展阶段

十九世纪,第二次技术革命(内燃机)使近代自然科学走向全面繁荣,流体力学理论逐步完善,水力学也取得了迅速地发展。

流体力学:

无旋流,法国的 Cauchy(1789 ~ 1857)于1815年严密推证了 Lagrange 无旋流的理论,法国的 Poisson(1781 ~ 1846)于1826年解决了第一个空间流动——无旋的绕圆球流动问题。法国的 Laplace(1794 ~ 1827)于1827年提出著名的 Laplace 方程。英国的 Rankine 指出,理想不可压流动的位势和流函数分别满足 Laplace 方程,因此理想不可压流体动力学问题是运动学问题。

旋涡流动:法国的 Cauchy 于1815年和英国的 Stokes(1819 ~ 1903)于1847年分别提出涡旋概念,把涡旋解释为流体微元体的转动。亥姆霍兹(H. Von Helmholtz, 1821 ~ 1894)和基尔霍夫(G. R. Kirchhoff, 1824 ~ 1887)对旋涡运动和分离流动进行了大量的理论分析和实验研究,提出了表征旋涡基本性质的旋涡定理、带射流的物体绕流阻力等学术成就。

十九世纪流体力学还产生了两个重要分支:黏性流体动力学和气体动力学。

黏性流:法国工程师纳维(C. L. M. H. Navier, 1785 ~ 1880)于1826年最先导出黏性液体运动方程。Poisson 于1822年、Saint · Venant(1797 ~ 1866)于1842年也导出黏性液体运动方程。英国的斯托克斯(G. G. Stokes)严格地导出了这些方程,并把流体质点的运动分解为平动、转动、均匀膨胀或压缩及由剪切所引起的变形运动。后来引用时,便统称该方程为纳维-斯托克斯方程。英国的雷诺(O. Reynolds, 1842 ~ 1912)于1883年用实验证实了黏性流体的两种流动状态——层流和紊流的客观存在,找到了实验研究黏性流体流动规律的相似准则数——雷诺数,以及判别层流和紊流的临界雷诺数,为流动阻力的研究奠定了基础。雷诺是紊流理论的创始者。1895年,他推出了平均紊流切应力 τ - S 方程——雷诺方程。

非恒定流:著名的有英国的 Lamb 和 Rayleigh, 1902年意大利学者 Allievi 导出了管道不稳定流的微分方程。

水力学:

法国的谢才(A. de Chézy, 1718 ~ 1798)1755年便总结出明渠均匀流公式——谢才公式,一直沿用至今。法国的 Henri do Pitot(1695 ~ 1771)制出了测量流动压强的仪器——皮托测压管。英国的 Giovanni Battista - Venturi(1746 ~ 1822)制出了测量流量的仪器——Venturi 流量计。法国医生 Jean Louis Poiseuille (1799 ~ 1869)制出了测量流体黏度的仪器——黏度计。德国水利工程师 Julius Weisbach (1806 ~ 1871)和法国工程师 Henry Philibert Gaspard Darcy (1803 ~ 1858)分别通过试验总结了管道流动的阻力计算公式——Weisbach Darcy 阻力公式。爱尔兰工程师 Robert Manning (1816 ~ 1897)总结了渠道粗糙情况的公式——曼宁公式。瑞利(L. J. W. Reyleigh, 1842 ~ 1919)在相似原理的基础上,提出了实验研究的量纲分析法中的一种方法——瑞利法。

佛汝德(W. Froude, 1810 ~ 1879)对船舶阻力和摇摆的研究颇有贡献,他提出了船模试验的相似准则数——佛汝德数,建立了现代船模试验技术的基础。

同时,气体动力学和热力学也得到了较快地发展。库塔(M. W. Kutta, 1867 ~ 1944)于1902年就提出绕流物体上的升力理论,但没有公开发表。

(4) 现代发展阶段及趋势

二十世纪,世界进入第三次工业革命,即电子和计算机时代,科学技术迅猛发展,新科学、新技术不断涌现。自从1907年第一架飞机在美国首飞成功,直到火箭、原子弹、人造卫星、宇宙飞船直到今天的航天飞机,使世界进入了计算机时代和航天时代。航天器的研究需要大量流体力学的理论。因此二十世纪的流体力学进入了现代革命阶段,并使得古典流体力学和水力学走上了融为一体的道路,出现了一个新的应用学科——工程流体力学。

普朗特(L. Prandtl, 1875 ~ 1953)建立了边界层理论,解释了阻力产生的机制。当时就像爱因斯坦提出的相对论一样,人们对此觉得不可理解。现在看来却是一项划时代的贡献。之后又针对航空技术和其他工程技术中出现的紊流边界层,提出混合长度理论。1918 ~ 1919年间,论述了大展弦比的有限翼展机翼理论,对现代航空工业的发展做出了重要的贡献。

儒科夫斯基(Н. Е. Жуковский, 1847 ~ 1921)从1906年起,发表了《论依附涡流》等论文,找到了翼型升力和绕翼型的环流之间的关系,建立了二维升力理论的数学基础。他还研究过螺旋桨的涡流理论以及低速翼型和螺旋桨桨叶剖面等。他的研究成果,对空气动力学的理论和实验研究都有重要贡献,为近代高效能飞机设计奠定了基础。

卡门(T. von Karman, 1881 ~ 1963)在1911年、1912年相继发表的论文中,提出了分析带旋涡尾流及其所产生的阻力的理论,人们称这种尾涡的排列为卡门涡街。1921年,由微分形式的边界层方程通过积分得出动量积分方程。由雷诺方程积分得到紊流的动量积分方程,但需要建立紊流切应力项的模型。在1930年的论文中,建议重叠层混合长度与离壁面的距离成比例。提出了计算紊流粗糙管阻力系数的理论公式。嗣后,在紊流边界层理论、超声速空气动力学、火箭及喷气技术等方面都有不少贡献。

布拉休斯(H. Blasius)在1913年发表的论文中,提出了计算紊流光滑管阻力系数的经验公式。1908年得出均匀流动下平板边界层的相似解。

伯金汉(E. Buckingham)在1914年发表的《在物理的相似系统中量纲方程应用的说明》中,提出了著名的 π 定理,进一步完善了量纲分析法。

尼古拉兹(J. Nikuradze)在1933年发表的论文中,公布了他对砂粒粗糙管内水流阻力系

数的实测结果——尼古拉兹曲线, 据此他还给紊流光滑管和紊流粗糙管的理论公式选定了应有的系数。后来谢维列夫对实际钢管做了同样的试验, 得出钢管的摩阻系数实验曲线。

科勒布茹克(C. F. Colebrook)在1939年发表的论文中, 提出了把紊流光滑管区和紊流粗糙管区联系在一起的过渡区阻力系数计算公式。

莫迪(L. F. Moody)在1944年发表的论文中, 给出了他绘制的实用管道的当量糙粒阻力系数图——莫迪图。至此, 有压管流的水力计算已渐趋成熟。

钱学森(Qian Xuesen)早在1938年发表的论文中, 便提出了平板可压缩层流边界层的解法——卡门-钱学森解法。他在空气动力学、航空工程、喷气推进、工程控制论等技术科学领域做出过许多开创性的贡献。

吴仲华(Wu Zhonghua)在1952年发表的《在轴流式、径流式和混流式亚声速和超声速叶轮机中的三元流普遍理论》和在1975年发表的《使用非正交曲线坐标的叶轮机三元流动的基本方程及其解法》两篇论文中所建立的叶轮机三元流理论, 至今仍是国内外许多优良叶轮机设计计算的主要依据。

周培源(Zhou Peiyuan)多年从事紊流统计理论的研究, 取得了不少成果, 1975年发表在《中国科学》上的《均匀各向同性湍流的涡旋结构的统计理论》便是其中之一。

二十世纪中叶由于大工业的形成、高新技术工业的出现和发展, 特别是电子计算机的出现、发展和广泛应用, 大大地推动了科学技术的发展, 流体力学应用越来越广泛, 分支学科越来越多, 既相互交叉又有横向联系。它们互相渗透、互相补充、互相促进, 使得理论、实验和数值计算紧密结合, 解决许多工程应用问题。成为全新的学科体系, 形成了大量的学科分支。这些分支的新学科有: (普通)流体力学、黏性流体力学、流变学、气体动力学、稀薄气体动力学、计算流体力学(水力学)、环境流体力学(水力学)、能源流体力学、渗流力学、非牛顿流体力学、多相流体力学、磁流体力学、化学流体力学、生物流体力学、地球流体力学等等。可以预测, 现代流体力学将进入各个工程领域, 而且只要有数学模型, 就可以借助计算机来求解。当今流体力学的发展趋势大致分为以下三个方面:

- ① 紊流的机理和紊流模型的研究;
- ② 各种新兴边缘学科的发展及应用(如多相流、非牛顿流体、生物流体等);
- ③ 实验模拟和计算机模拟及应用。

1.2 流 体

1.2.1 流体的定义

流体与固体是物质的不同表现形式, 它们具有三个物质的基本属性: 由大量的分子组成; 分子不断地做随机热运动; 分子间存在着分子力的作用。但这三个物质的基本属性表现在气体、液体、固体方面却有着量和质的差别。由于同体积内分子数目、分子间距、分子的内聚力、排列顺序以及热运动状况等方面的物质内部微观差异, 导致它们宏观表象的不同: 固体有一定的体积和一定的形状; 液体有一定的体积而无一定的形状, 有自由表面; 气体无一定的体积也无一定的形状。

流体与固体在微观结构上的差别使得流体在力学性能上有如下的两个特点:

第一, 流体几乎不能承受拉力, 因而可以认为流体内部不存在抵抗拉伸变形的张应力;

第二, 流体在平衡状态下不能承受剪切力, 任何微小切力的作用都会使流体发生连续变形。

固体显然没有这两个特点。它除了和流体一样能承受压力外, 还能承受切力和拉力, 而其内部相应产生压应力、切应力和拉应力(张应力)以抵抗变形, 如果应力不大到一定数值时, 形状不会被破坏。

概括流体的这两个特点可定义: 流体是一种受任何微小切应力作用都会发生连续变形的物质。流体的这个特点称为流体的易流动性, 易流动性既是流体命名的由来, 也是流体区别于固体的根本标志。

1.2.2 连续介质的概念

如前所述, 流体是由大量做随机运动的分子组成。从微观角度来看, 分子之间存在着间隙, 因此, 流体的一切物理量在空间内是非连续分布的。同时, 由于分子的随机运动, 又导致任一空间点上流体物理量对时间的不连续性。因此, 描述分子各自运动的理论将是十分复杂的, 它已远远超出我们目前的知识水平。然而, 分子的体积是很小的, 分子之间的空隙尺度也很小, 它与常用的宏观尺度相比是微不足道的。流体力学是论述流体的宏观特性, 研究流体宏观机械运动规律, 因此把流体当作一种连续分布的介质处理, 在大多数场合下是合理的。这一概念的含义是认为流体不是由独立的分子所组成, 而假想为无限多的, 其间毫无空隙的流体质点所组成的连续介质或连续体, 这种连续介质仍然具有流体的一切基本力学特性。

流体中任意小的一个微元部分称为流体微团, 当流体微团的体积无限缩小并以某一坐标点为极限时, 流体微团就成为处于这个坐标点上的一个流体质点, 它在任何瞬时都具有一定的物理量, 如质量、密度、压强、流速等。因而在连续介质中, 流体质点的一切物理量都是坐标和时间变量的连续函数, 形成各种物理量的标量场和矢量场, 这样我们就可以应用连续函数和场论等数学工具来研究流体的平衡及运动规律, 这就是将流体假定为连续介质的作用。

1.3 流体的主要物理性质

1.3.1 密度、重度和相对密度

(1) 密度和比重

单位体积内所含有的流体质量称为流体密度, 以符号 ρ 表示。对均质流体, 若在流体内任取一微元体积 ΔV 内所含有的质量为 ΔM , 则密度 ρ 表示为:

$$\rho = \frac{\Delta M}{\Delta V} \quad (1.1)$$

对于非均质流体, 根据连续介质的假设密度 ρ 表示为:

$$\rho = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta M}{\Delta V} = \frac{dM}{dV} \quad (1.2)$$

该密度称为点密度。一般而言, 流体密度随空间位置和时间发生变化。

密度的单位是 kg/m^3 。

比容是流体单位质量所占有的体积，它与密度的关系为

$$v = \frac{1}{\rho} \quad (1.3)$$

(2) 重度和相对密度

流体单位体积内具有的重力称为重度，以 γ 表示。对均质流体，如果微元体积 ΔV 中含有重力为 ΔG ，则

$$\gamma = \frac{\Delta G}{\Delta V} \quad (1.4)$$

在 SI 制中， γ 的单位是 N/m^3 。

对非均质流体，点的重度为

$$\gamma = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta G}{\Delta V} = \frac{dG}{dV} \quad (1.5)$$

根据重力与质量的关系，可得到 γ 、 ρ 及 v 的换算关系式：

$$\gamma = \rho g = \frac{1}{v} g \quad (1.6)$$

在 γ 、 ρ 及 v 中任知其一即可求得其余两个数值。

此外，物理学上还有相对密度的概念，它是物体的密度与同样体积 4°C 蒸馏水的密度之比，是一个量纲一的纯量。如果用下标 w 代表 4°C 蒸馏水的相应物理量，则流体的相对密度 S 为

$$S = \frac{\rho}{\rho_w} = \frac{v_w}{v} \quad (1.7)$$

在 SI 制中：

4°C 蒸馏水的密度： $\rho_w = 1000 \text{ kg/m}^3$

4°C 蒸馏水的重度： $\gamma_w = 9810 \text{ N/m}^3$

4°C 蒸馏水的比容： $v_w = 0.001 \text{ m}^3/\text{kg}$

由式(1.7)可知，若已知某流体的相对密度 S ，便可求得该流体的密度、重度和比容：

$$\left. \begin{aligned} \rho &= 1000S \quad \text{kg/m}^3 \\ \gamma &= 9810S \quad \text{N/m}^3 \\ v &= \frac{0.001}{S} \quad \text{m}^3/\text{kg} \end{aligned} \right\} \quad (1.8)$$

流体的密度、重度、比容均与流体的温度和压强有关，表 1.1 列出了水在标准大气压下不同温度时的密度值。

表 1.1 水的密度与温度的关系

温度/ $^\circ\text{C}$	0	4	10	20	40	60	80	100
密度/ (kg/m^3)	999.87	1000.00	999.75	998.26	992.26	983.38	971.94	958.65

石油及其产品的相对密度与温度的关系可用下式计算：

$$S_t = S_{20} - \beta(t - 20) \quad (1.9)$$

式中 S_t ——油品在油温为 $t^\circ\text{C}$ 时的相对密度；

S_{20} ——该油品在油温为 20°C 时的相对密度；

β ——油品的温度校正系数, $^{\circ}\text{C}^{-1}$, 其值随油温为 20°C 的相对密度 S_{20} 的不同而不同, 见表 1.2;
 t ——油品的温度, $^{\circ}\text{C}$ 。

表 1.2 油品的温度校正系数

S_{20}	0.70	0.72	0.74	0.76	0.78	0.80	0.82	0.84	0.86	0.88	0.90	0.92	0.94	0.96	0.98	1.00
$\beta \times 10^{-4}/^{\circ}\text{C}^{-1}$	8.97	8.70	8.44	8.18	7.92	7.65	7.38	7.12	6.86	6.60	6.33	6.07	5.81	5.54	5.28	5.15

1.3.2 压缩性和膨胀性

(1) 压缩性

在温度不变的情况下, 流体的体积随压力的增加而变小的性质叫压缩性, 可用体积压缩性系数 β_p 来表示。当压强由 p 增加 dp 时, 体积被压缩了 dV , 则压缩性系数 β_p 为

$$\beta_p = -\frac{\frac{dV}{V}}{dp} = -\frac{1}{V} \frac{dV}{dp} \quad (1.10a)$$

β_p 的单位是 m^2/N , 工程制用 $1/\text{大气压}$ 。

式中, $\frac{dV}{V}$ 是体积的相对变化量。所以 β_p 的物理意义是: 当温度不变时每增加单位压强所产生的流体体积的相对变化率。

流体被压缩时, 体积 V 内的质量并没有改变, 则有,

$$dM = d(\rho V) = \rho dV + V d\rho = 0$$

所以

$$-\frac{dV}{V} = \frac{d\rho}{\rho}$$

故压缩性系数又可表示为

$$\beta_p = \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dp} \quad (1.10b)$$

体积压缩性系数的倒数叫做流体体积弹性系数或体积弹性模数, 以 K 表示:

$$K = \frac{1}{\beta_p} \quad (1.11)$$

K 的单位为 N/m^2 。在不太大的压强下, 某些常见液体的体积弹性系数平均值如下:

水: $K = 1.962 \times 10^9 \text{N}/\text{m}^2$;

煤油: $K = 1.687 \times 10^9 \text{N}/\text{m}^2$;

柴油: $K = 1.570 \times 10^9 \text{N}/\text{m}^2$ 。

液体的压缩系数非常小。例如对于 20°C 的水, 从 $1 \sim 500$ 个大气压下, β_p 的平均值仅为 $4.32 \times 10^{-10} \text{m}^2/\text{N}$ 。因此除在液体中以音速大小传播的波动现象外, 在流体力学中, 液体的压缩性影响可以忽略, 认为 ρ 与 p 无关。表 1.3 列出了不同温度时水的体积弹性系数。

表 1.3 不同温度下水的 μ 、 ν 、 K 、 σ 值

$t/^{\circ}\text{C}$	$\mu/(10^{-3} \text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2)$	$\nu/(10^{-6} \text{m}^2/\text{s})$	$K/(10^9 \text{N}/\text{m}^2)$	$\sigma/(\text{N}/\text{m})$
0	1.792	1.792	2.02	0.0756
5	1.519	1.519	2.06	0.0749
15	1.140	1.140	2.15	0.0735