

水力机械流体力学系列丛书

SHUILI JIXIE

LIUTI LIXUE JICHU

水力机械 流体力学基础

◎ 刘树红 吴玉林 编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

水力机械流体力学系列丛书

水力机械流体力学基础

SHUILI JIXIE LIUTI LIXUE JICHU

© 刘树红 吴玉林 编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书为“水力机械流体力学系列丛书”之一。全面系统地论述了应用于水力机械和其他流体机械等方面的流体力学的基础知识和基本原理。着重论述了不可压缩和无粘性流体力学,在基本方程的推导中也介绍了可压缩和粘性流体的方程。本书介绍了流体力学的研究对象和发展,流体的分类和主要性质,以及流动的分类等基本概念;比较全面地介绍了流体静力学、流体运动学和流体动力学的基本原理和公式,并介绍了这些原理在水力机械和工程中应用实例。在此基础上论述了流体力学在工程上和在水力机械中重要应用专题,包括量纲分析、涡旋运动、平面和轴对称无粘性不可压缩流体势流、翼型和叶栅绕流及不可压缩流体的管道流动和水击等。

本书可作为流体机械、叶轮动力机械、水利工程、建筑机械、化工工程、矿山工程、石油和天然气工程等专业本科生和研究生的教学及科研参考书,也可作为上述专业的工程技术人员参考书。

图书在版编目(CIP)数据

水力机械流体力学基础/刘树红,吴玉林编著. —北京:
中国水利水电出版社, 2007

(水力机械流体力学系列丛书)

ISBN 978-7-5084-4556-4

I. 水… II. ①刘…②吴… III. 水力机械—流体力学
IV. TV136

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 050737 号

书 名	水力机械流体力学系列丛书 水力机械流体力学基础
作 者	刘树红 吴玉林 编著
出版 发行	中国水利水电出版社(北京市三里河路 6 号 100044) 网址:www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话:(010)63202266(总机)、68331835(营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话:(010)88383994、63202643 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京纪元彩艺印刷有限公司
规 格	787mm×1092mm 16 开本 14.5 印张 344 千字
版 次	2007 年 9 月第 1 版 2007 年 9 月第 1 次印刷
印 数	0001—3000 册
定 价	46.00 元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

前言

本书为“水力机械流体力学系列丛书”之一。全面系统地论述了应用于水力机械和其他流体机械等方面的流体力学的基础知识和基本原理。着重论述了不可压缩和无粘性流体力学，在基本方程的推导中也介绍了可压缩和粘性流体的方程。《流体力学基础》可以作为流体机械、流体工程、叶轮动力机械和水利工程、热能工程等专业本科生在《工程力学》课程基础上的技术基础课，读者也可以通过直接阅读本书了解流体力学的基本原理和方程。编写本书的主要目的是希望读者通过《流体力学基础》的学习，能够学会利用流体力学的基本原理去解决工程上的实际问题。故本书在介绍流体力学基本概念和基本方程的同时，主要介绍了在工程上广泛应用的典型流动。

本书是在原清华大学有关课程讲义的基础上编写的，主要论述了流体力学的研究对象和发展，流体的分类和主要性质，以及流动的分类等基本概念；比较全面介绍了流体静力学、流体运动学和流体动力学的基本原理和公式；并介绍了这些原理在水力机械和工程中的应用实例。在此基础上论述了流体力学在工程上和在水力机械中主要的应用专题，包括量纲分析、涡旋运动、平面和轴对称无粘性不可压缩流体势流、翼型和叶栅绕流及不可压缩流体的管道流动和水击等问题。在工程上可以利用涡旋动力学进行流场分析和诊断。势流理论、翼型和叶栅理论是上述各专业课程的理论基础。

在编写过程中，本书注重概念的讲解，对于量纲分析、涡旋流动、势流、翼型和叶栅理论的概念论述比较深入；同时，从工程应用角度出发，书中内容自成体系。

全书共分10章，第1、第2、第3、第4、第5、第6、第10章由刘树红、吴玉林编写，第7、第8、第9章由周雪漪、罗先武编写，全书由刘树红统稿。在编写过程中，得到清华大学水利工程系和热能工程系的前辈和同事们的支持，也得到了其他高校有关教师的帮助，陈铁军和李军对书中的公式和插图进行了校对。

在此一并表示衷心的感谢! 本书得到了国家自然科学基金重点项目(编号: 10532010)的资助。

对于书中存在的缺点和错误, 敬请读者批评指正。

编 者

于“水沙科学和水利水电工程国家重点实验室”(清华大学)

2006 年 9 月

目 录

前言

■ 1 流体流动的基本概念	1
1.1 流体力学的发展	1
1.2 流体的研究对象	11
1.3 流体的主要物理性质	13
1.4 流体力学的研究方法	16
1.5 流动的基本分类	19
■ 2 流体静力学	23
2.1 作用于流体上的力	23
2.2 静止流体作用力平衡微分方程——欧拉平衡方程	25
2.3 压强的表示方法及单位	28
2.4 非惯性坐标系中静止液体	29
2.5 测压计	31
2.6 作用在平面上的总水压力	33
2.7 作用在曲面上的总水压力	34
2.8 浮力及浮潜体稳定	35
■ 3 流体运动学	39
3.1 研究流体运动的两种方法	39
3.2 流体运动学的基本概念	42
3.3 连续性方程式	49
3.4 流体微团运动的分解	52
3.5 旋涡运动与无旋运动	55
■ 4 流体动力学基础	58
4.1 理想流体运动微分方程	58
4.2 粘性流体的运动微分方程	61
4.3 欧拉运动微分方程的积分	64
4.4 离心泵叶轮中欧拉运动微分方程的积分	66
4.5 定常总流的伯努利方程	68
4.6 定常总流能量方程的计算	71
4.7 定常总流动量方程计算	75
■ 5 相似原理与量纲分析	79
5.1 流动相似	79

5.2	动力相似准则	81
5.3	水力机械的流动相似	85
5.4	量纲分析	88
5.5	相似原理与量纲分析的应用	95
6	涡旋运动	98
6.1	涡旋运动的基本概念	98
6.2	粘性流动中涡的传输方程	102
6.3	无粘性流动中涡的传输方程	105
6.4	涡旋在不可压无粘性流动中引起的速度场	109
6.5	常见的涡旋运动	112
7	势流—无粘性不可压缩流体的无旋运动	119
7.1	空间势流的基本方程	119
7.2	平面势流	124
7.3	平面定常势流的复势	127
7.4	轴对称无粘性不可压缩流体的无旋运动——轴对称势流	134
7.5	基本势流	138
7.6	平行流和偶极子的叠加及圆球绕流问题	142
8	翼型绕流	144
8.1	翼型的几何特性和动力特性	144
8.2	翼型绕流的保角变换方法	151
8.3	儒可夫斯基翼型绕流	160
8.4	任意柱形物体不脱体绕流	165
8.5	薄翼理论——奇点分布法	170
8.6	有限翼展翼型、诱导阻力	179
9	叶栅绕流	184
9.1	基本概念	184
9.2	叶栅的绕翼型环量	186
9.3	流体绕直列叶栅流动时对翼型的作用力	190
9.4	叶栅特征方程	193
9.5	直列平板叶栅绕流的保角变换法	198
9.6	叶栅的动力特性系数	202
10	管道不可压缩流动	205
10.1	不可压缩流体恒定圆管层流	205
10.2	管道恒定湍流水头损失	209
10.3	有压管道流动计算	215
10.4	简单管道的水力计算	215
10.5	有压管道中的水击——非恒定流	218
	参考文献	225



流体流动的基本概念

本章主要阐述了流体力学的概念与发展简史；流体的主要物理性质及流体力学的研究方法。流体的连续介质模型是流体力学的基础，在此假设的基础上引出了理想流体与实际流体、可压缩流体与不可压缩流体、牛顿流体与非牛顿流体概念。

1.1 流体力学的发展

从阿基米得到现在的 2000 多年，特别是从 20 世纪以来，流体力学已发展成为基础科学体系的一部分，同时又在工业、农业、交通运输、天文学、地学、生物学、医学等方面得到广泛应用。

今后，人们一方面将根据工程技术方面的需要进行流体力学应用性的研究；另一方面将更深入开展基础研究以探求流体的复杂流动规律和机理，主要包括：通过湍流的理论和实验研究，了解其结构并建立计算模式；多相流动；流体和结构物的相互作用；边界层流动和分离；生物体内和环境中流体流动；有关各种实验设备和仪器等。

1.1.1 流体力学研究内容

流体力学是力学的一个分支，是一门研究流体的平衡和水力机械运动规律及其实际应用的科学。也就是说，流体力学研究流体处于静止状态和运动状态时，其本身流动的规律以及流体和固体壁面之间相互作用规律。

流体力学中研究的对象是流体，最主要的是水和空气。1738 年瑞士伯努利在出版他的专著时，首先采用了水动力学这个名词并作为书名；1880 年前后出现了空气动力学这个名词；1935 年以后，人们概括了这两方面的知识，建立了统一的体系，统称为流体力学。

除水和空气以外，流体还包括水蒸气、润滑油、地下石油、含泥沙的江水、血液、超高压作用下的金属和燃烧后产生成分复杂的气体、高温条件下的等离子体等。气象、水利的研究，船舶、飞行器、叶轮机械和核电站的设计及其运行，可燃气体或炸药的爆炸以及天体物理的若干问题等，都广泛地用到流体力学知识。由于研究的对象不同，从而形成了各种流体力学的分支，例如，上面所讲的水动力学、气体动力学，此外还有泥沙动力学、生物流体力学、稀薄气体力学、等离子体流体力学和天体流体力学。许多现代科学技术所关心的问题既受流体力学的指导，同时也促进了它不断地发展。1950 年后，电子计算机的发展又给予流体力学以极大的推动，形成了计算流体力学（Computational Fluid Dynamics，简称 CFD）。

流体力学所研究的基本规律，有两大组成部分：一是关于流体平衡的规律，它研究流体处于静止（或相对平衡）状态时，作用于流体上的各种力之间的关系，这一部分称为流体静力学（Fluid Statics）；二是关于流体运动的规律，它研究流体在运动状态时，作用于流体上的力与运动要素之间的关系，以及流体的运动特征与能量转换等，这一部分称为流体动力学（Fluid Dynamics），此外，研究流体运动的描述和表达的部分成为流体运动学（Fluid Kinematics）。

1.1.2 流体力学的发展历史

流体力学是在人类同自然界作斗争和在生产实践中逐步发展起来的。例如，古代中国有大禹治水疏通江河的传说；李冰父子带领劳动人民修建的都江堰和管仲治水，沈括发明了浮漏仪，葛洪发明了飞车，揭暄进行了涡旋试验；在国外，古罗马人建成了大规模的供水管道系统等。

对流体力学学科的形成作出第一个贡献的是古希腊的阿基米得，距今约 2200 年以前，西西里岛的希腊学者阿基米得写了“论浮体”一文。论文对静止时的液体力学性质作了第一次科学总结。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。

流体力学在我国的发展历史也非常悠久。其中原因之一是我国水利事业的历史。4000 多年前的“大禹治水”的故事——顺水之性，治水需引导和疏通。秦朝在公元前 256～公元前 210 年修建了我国历史上的三大水利工程（都江堰、郑国渠、灵渠）——明渠水流、堰流。古代的计时工具“铜壶滴漏”——孔口出流。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。隋朝（587～610 年）完成的南北大运河。隋朝工匠李春在冀中洹河修建（605～617 年）的赵州石拱桥——拱背的 4 个小拱，既减压主拱的负载，又可宣泄洪水。

1.1.2.1 经典流体力学的发展简史

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密的科学，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、能量三个守恒定律奠定之后才逐步形成的。

经典流体力学是从 17 世纪开始的，首先归功于牛顿发明了微积分。1687 年牛顿在名著《自然哲学的数学原理》中讨论了流体的阻力、波浪运动等内容，使流体力学开始成为力学中的一个独立分支。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。但是，牛顿还没有建立起流体动力学的理论基础，他提出的许多力学模型和结论同实际情形还有较大的差别。

此后，流体力学的发展主要经历了三个阶段。

第一阶段：18 世纪伯努利所提出的液体运动的能量估计及欧拉所提出的液体运动的解析方法，为研究液体运动的规律奠定了理论基础，从而在此基础上形成了一门属于数学的古典“水动力学”（或古典“流体力学”）。其中包括 1738 年伯努利在名著《流体动力

学》中提出了伯努利方程。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,得到了流体定常运动下的流速、压力、管道高程之间的关系——伯努利方程。1752年达朗贝尔提出了连续性方程。1775年欧拉提出了描述流体流动的方法——欧拉法和无粘性流体流动的动量方程——欧拉方程。欧拉在名著《流体运动的一般原理》中提出理想流体概念,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,建立了理想流体基本方程和连续方程,正确地用微分方程组描述了无粘性流体的运动;从而提出了流体运动的解析方法,同时提出了速度势的概念。这些成就推动了无粘性流体流动的研究,包括自由水面流动的水波运动。

在试验流体力学方面法国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;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,位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。1781年拉格朗日首先引进了流函数的概念,并对于无旋运动作了不少研究。德国海姆霍兹对于涡旋运动研究……在上述的研究中,流体的粘性并不起重要作用,即所考虑的是无粘性流体。这种理论当然阐明不了流体中粘性的效应。

第二阶段:19世纪的进展主要是对无粘性流体涡旋流动和粘性流体流动的初步研究。但由于其所用数学的复杂性和理想流体模型的局限性,不能满意地解决工程问题。19世纪,工程师们为了解决许多工程问题,尤其是要解决带有粘性影响的问题。于是他们部分地运用流体力学,部分地采用归纳实验结果的半经验公式进行研究,就形成了以实验方法来制定经验公式的“实验流体力学”——水力学。但由于有些经验公式缺乏理论基础,使其应用范围狭窄,且无法继续发展。但是水力学至今仍与流体力学并行地发展。

在古典《水动力学》的基础上纳维和斯托克斯提出了著名的实际粘性流体的基本运动方程为N—S方程。1822年法国工程师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基础导出了这个方程,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(Navier—Stokes方程,简称N—S方程),它是流体动力学的理论基础。上面说到的欧拉方程正是N—S方程在粘度为零时的特例。

第三阶段:从19世纪末起,人们将理论分析方法和实验分析方法相结合,以解决实际问题,同时古典流体力学和实验流体力学的内容也不断更新变化,如提出了相似理论和量纲分析,边界层理论和湍流理论等,在此基础上,最终形成了理论与实践并重的研究实际流体模型的现代流体力学。在20世纪60年代以后,由于计算机的发展与普及,流体力学的应用更是日益广泛。因此,流体力学进入到了近代流体力学阶段。

1.1.2.2 近代流体力学的发展

从19世纪末,流体力学学者主要研究了粘性流体的流动和高速流动问题,努力使流体力学的理论可以应用工程实践。在航空领域中的巨大成就的主要因素之一就是流体力学的成就,同时,也是流体力学发展的动力。其中主要的成就有以下几个方面。

1883年雷诺发现了流体流动的两种流态:层流和湍流。两种流态由索摩费尔德所命

名的雷诺数所决定的，并认为湍流是由于层流流动产生不稳定的结果。雷诺还引进了湍流的表观应力—雷诺应力的概念，并于1895年导出了湍流平均量的动量方程—雷诺方程。雷诺的成果推动了百年来的湍流研究。尽管湍流问题至今还没有解决，但是该成果是人们对湍流的不断深化。除此之外，1858年海姆霍兹指出了理想流体中旋涡的许多基本性质及旋涡运动理论，并于1887年提出了脱体绕流理论。1877年布辛涅斯克提出了湍流的涡粘性的假设力图封闭湍流的雷诺方程。

普朗特于1904年在海德贝尔格的数学会会上宣读了“具有很小摩擦的流体运动”论文。从此普朗特学派从1904~1921年间逐步将N—S方程作了简化，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。能实际计算在简单情形下，边界层内流动状态和流体同固体间的粘性力。后来普朗特又提出了许多新概念，把边界层理论广泛地应用到飞机和叶轮机械的设计中去。这一理论既明确了理想流体的适用范围，又能计算物体运动时遇到的摩擦阻力。使上述两种情况得到了统一。边界层理论的重大意义在于，在人们还不可能求解完整地N—S方程以前，解决求解流动的阻力计算问题。1913年，普朗特继库塔—儒可夫斯基研究了机翼的升力问题，提出了升力线理论和最小阻力理论。1925年普朗特提出了混合长度理论，从理论上求解了湍流雷诺方程。除了普朗特以外，1910年英国的泰勒研究了激波内部的结构，1915年提出了湍流涡扩散理论，可以求解湍流雷诺方程；1923年研究了两个同心圆筒间流动失稳的问题，1935年建立了均匀各同性湍流理论。

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，以儒可夫斯基、恰普雷金、普朗特等为代表的科学家，开创了以无粘不可压缩流体位势流理论为基础的机翼理论，阐明了机翼怎样会受到升力，从而空气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。

机翼理论和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，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，飞行器速度超过声速，进而实现了航天飞行，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炸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、超音速空气动力学、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。

前苏联科学家在此阶段也做出了很大的贡献。谢多夫完善了量纲分析和相似理论。1941年柯尔莫果洛夫提出了局部各向同性湍流理论，他还首次用湍流能量方程和湍流频率方程组成两方程的湍流模型，来封闭湍流雷诺方程。1944年朗道提出了经无限次分叉从层流到湍流的过渡。

同时,以周培源为代表的我国科学家为近代流体力学的发展作出了很大贡献。1945年周培源发表了“关于湍流关联速度和湍流脉动方程的解”,首先得到了湍流关联函数的方程,为湍流的高阶矩湍流模型提供了基础。20世纪30年代,钱学森与冯·卡门一道提出了近似计算高超亚声速气动力的卡门—钱方程,40年代提出了跨声速流动的相似率。郭永怀等提出了跨声速流动上下临界马赫数的概念和跨声速流动的稳定性的稳定性。1944年林家翘用渐进方法求解了奥尔—索末费尔德流动稳定性方程,理论上得到了T—S波,并为后来的风洞试验结果所证实。

近代流体力学的发展与工程实践紧密联系,解决了人类发展的关键技术,同时也推动了流体力学的发展,奠定了20世纪后半叶的现代流体力学发展的基础。

1.1.2.3 现代流体力学的发展

现代流体力学是用现代的理论方法,数值计算和试验技术,研究人类社会生产和生存相关的各领域的流动问题。

现代流体力学在理论上的成就有:周培源1976年研究了网后均匀各向同性湍流的衰减规律。同时在统计理论方面对湍流的封闭性做了很多工作。湍流方程的封闭理论主要有准正则近似理论、Kraichnan的直接相互近似(DIA)和应用非平衡统计力学方法解决湍流的封闭性问题。

20世纪70年代以来湍流的拟序结构成为研究湍流结构的新的起点。湍流的特征是间歇有序性,即拟序结构的触发是不规律的,但一旦触发,它以近乎确定的规律发展。这方面的研究包括发现和证实拟序结构,如边界层中的猝发现象、混合层中的大涡;利用现代信息处理技术(条件采样,模式识别)检测和分析拟序结构;定量描述和了解拟序结构的生成和发展,应用它控制湍流,并构造湍流模式。70年代以来湍流发表的另一个重要的方面是现代混沌理论(Chaos),从1963年Lorenz开始,将N—S方程简化成三个一阶常微分方程组成的非线性动力系统。随着参数的变化它会经历稳定解、周期解、具有间歇性的解和湍乱无章的混沌解,这正是湍流发展过程和完全发展了的湍流所具有的特征。

现代流体力学的进展是和采用各种数学分析方法和建立大型、精密的实验设备和仪器等研究手段分不开的。从20世纪50年代起,电子计算机不断完善,使原来用分析方法难以进行研究的课题,可以用数值计算方法来进行,出现了计算流体力学这一新的分支学科。与此同时,由于民用和军用生产的需要,液体动力学等学科也有很大进展。

20世纪60年代,根据结构力学和固体力学的需要,出现了计算弹性力学问题的有限元法。经过10多年的发展,有限元分析这项新的计算方法又开始在流体力学中应用,尤其是在低速流和流体边界形状甚为复杂问题中,优越性更加显著。近年来又开始了用有限元方法研究高速流的问题,也出现了有限元方法和差分方法的互相渗透和融合。20世纪60年代以后,计算流体力学的迅速发展使流体力学内涵不断地得到了充实与提高。

从20世纪60年代起,流体力学开始了流体力学和其他学科的互相交叉渗透,形成新的交叉学科或边缘学科,如物理—化学流体动力学、磁流体力学、生物流体力学、地球和星系流体力学、非牛顿流体力学等;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。

1.1.2.4 流体力学发展与展望

(1) 21 世纪我国国民经济的发展对流体力学的要求。20 世纪初,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和银河系。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。这些学科是流体力学中最活跃、最富有成果的领域。

在未来的人类社会的发展过程中,流体力学有着广阔的应用前景,同时,对我国的经济建设和社会持续发展起不可忽视的作用。以下通过国民经济的几个重要部门加以说明。

1) 能源工程。我国的能源开发在国民经济和社会发展上起决定作用。不管是煤、石油和天然气的开采,火力发电、水力发电、核能利用、新能源(包括风能、地热能、海洋能和太阳能)的开发流体力学都起到了很大作用。因为这些能源本身是流体、或是能源在转化过程中离不开流体。

石油和天然气本身就是流体,在其勘探、开采和输运过程中流体力学的研究起很大作用。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。

现代煤的清洁燃烧中煤的汽化和液化就是流体运动和转化的过程,燃烧离不开气体,这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。

火力发电、水力发电和核能发电中采用各种叶轮机械,其流动属于复杂的内部流动问题,再加上叶轮的旋转,形成了复杂的旋转湍流,旋转湍流的模拟是目前流体力学研究的实际工程课题之一。此外,这些叶轮机械高效率和高性能的研究,非定常流动的研究、涡流动的研究和流动诱发结构振动的研究都是工程上要解决的课题。

此外还有流体机械和设备的节能问题,如何提高流体机械和设备的效率和各种性能也是流体力学应研究的问题,尤其我国目前生产效率低、能耗大,这个问题就更加突出。

2) 环境问题。人类面临的生存环境问题和自然灾害是对人类的最大的挑战。例如,全球气候变暖、臭氧空洞、酸雨、土地沙漠化、热带风暴、地质灾害等的预测需要多学科共同努力加以研究。

在关于天气预报和气候预报方面,运用流体力学—热力学方程组所作的预报称为数值预报或动力预报。目前数值天气预报对短期环流形势已能作出令人满意的预报。但逐日预报的可预报性时限为 2~3 周,因此月以上的长期天气预报和气候预报的问题,从目前来看,不但动力可预报性问题没有从理论上很好解决,而且从数值计算的实际情况来看,如计算误差的积累等,动力预报也是一时难以取得进展的。目前国内外长期预报主要采用统计方法,动力数值方法只处于实验阶段。经过近期的理论调研,考虑到 10 年预测时效较长,确定以随机—动力气候预报模式来预测未来 10 年降水及热带气候趋势,对于国民经济的发展有重要作用。

对大气和水环境污染的研究和预报,沙漠迁移、河流泥沙运动等,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范围。

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（其中包括环境空气动力学、建筑空气动力学）。这是一门涉及经典流体力学、气象学、海洋学和水力学、结构动力学等的新兴边缘学科。

3) 航空航天和航海以及高速陆地交通工具对流体力学的要求。高马赫数的飞机和航天器的外部流动问题，航空发动机和航天推进器的流动设计和流动计算，仍然是推动流体力学进步的重要因素，这些工程问题的解决需要流体力学在试验研究、理论分析和数值模拟等方面的不断进步，需要在流体力学的基本问题上，如湍流的结构及其计算模式；多相流动；流体和结构物的相互作用；边界层流动和分离等问题的研究及进展。

高速舰船和武器的发展对水动力学、舰船减阻、空化流动和波浪运动等方面的深入研究。高速列车的研究也牵扯到流体力学在超高速燃烧、噪声和复杂高速绕流方面的研究。

4) 材料科学中的流体力学问题。材料科学中的流体力学问题主要是指材料在加工过程中，在材料晶体生成过程中，在高分子材料生成过程中的流体力学问题，也包括各种冶金过程中金属液体的流动问题。其中包括非牛顿流体力学，电磁流体力学等领域。还有材料在改性加工中多相流体力学问题，例如，等离子喷镀、微粉和纳米颗粒加工。

等离子体是自由电子、带等量正电荷和负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。

5) 微流体力学问题。信息科学的发展，推动了微型电子机械的产生和发展，计算机的制造需要各种微电源、微型泵、微型机械设备、微型阀门和微型传感器等形成了微电子机械系统（MEMS）领域。微型设备和微通道中的流动的研究已有很大的进展，但是随着微型设备的不断发展，新的微流体力学还会不断地提出。

6) 生物流体力学问题。生物流体力学也是目前研究的重点，因为他对生命过程及农业的发展有密切的关系。生命体中的细胞充满了液体，生命过程是复杂的过程也包括流体的流动。目前国内外很多学者进行超声波诱导空化的研究，以期利用空化和空蚀，来加速人体血栓、结石、肿瘤等的治疗。此外流体力学也会在生物技术和生物工程发挥作用。

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。

(2) 21 世纪流体力学进展与展望。从阿基米得到现在的 2000 多年，特别是从 20 世纪以来，流体力学已发展成为基础科学体系的一部分，同时又在工业、农业、交通运输、天文学、地学、生物学、医学等方面得到了广泛应用。

今后，人们一方面将根据工程技术方面的需要进行流体力学应用性的研究；另一方面将更加深入地开展基础研究以探求流体的复杂流动规律和机理，主要包括：通过湍流的理论和实验研究，了解其结构并建立计算模式；多相流动；流体和结构物的相互作用；边界层流动和分离；生物、地学和环境流体流动等问题；有关各种实验设备和仪器等。周恒院士在展望 21 世纪流体力学发展时，提出了 6 个研究课题：“湍流与转捩”、“旋涡、分离和

非定常流”、“计算流体力学”、“流场精细测量技术”、“多相流”、“未来数字地球计划对流体力学可能提出的挑战”等6个方面,作为解决未来技术发展所需特别重视研究的流体力学问题。这些流体力学基础问题和其他问题的研究会促进流体力学的学科进步。

(3) 21世纪水力机械的展望及对流体力学的需求。本书的主要内容主要介绍水力机械中的流体力学基础知识。水力机械包括各种形式的水泵、阀门、水轮机、液力传动设备、液体分离和液体掺混搅拌设备、各种液体射流装置等液体的功能转换设备。水力机械在21世纪会有进一步的发展,也会对其所应用的不可压缩流体流动研究提出新的要求。

1) 新型水力机械的出现和发展对流体力学的要求。希望随着国民经济的发展和人类社会的进步,新的水力机械会不断出现,例如,新型环保型水轮机及其他水力机械,环保型水轮机以促进低水头水能的利用,同时对水环境有一定的改善作用;环境工程中也不断出现新型水力机械,例如,各种搅拌器和曝气机;海洋能的开发,包括潮汐能,海浪能,海流能和海洋温差能发电,都需要新型的水力机械。

微型泵及其他微型水力机械的出现也为流体力学提出了新的要求。

微型泵用在喷墨打印、环境测试和电子冷却。小型泵医疗的潜在应用包括微量药量的传输控制和检测、纳米化学药品的制造和人工胰腺的发展。近10几年来,根据不同的作用原理,提出了多种型式的微型泵,分成非机械作用式和机械作用式两大类。非机械作用式Knudsen泵利用热蠕变效应输送气体。机械式微型泵的雷诺数很小,离心力和惯性力很小,不能采用常规的离心式和轴流式叶轮。已制造出以下几种机械式微型泵,有齿轮泵,隔膜泵,压电效应容积泵,推进波作用的压电容积泵,激光驱动泵,无阀扩压管泵,以及电动水动力式微型泵(EHP)等。此类微型泵制造加工困难,长期运行会产生磨蚀和堵塞等问题。泵的排量也很小。连续式平行轴转子泵,已设计出一种螺旋式三维装置,转轴平行于流动方向。连续式垂直轴转子泵,该泵有一个垂直于流动方向的偏心圆柱转子非对称地置于平行流道中,大小不同的间隙产生了不同的阻力,推动流体流动。大多数微型泵在设计时,仅考虑了制造的可行性,很少进行流体动力学分析。很少论文涉及到泵的理论模型、性能预测和内部流动的分析。由于缺少理论模型和流体动力学分析的指导,大多数微型泵的性能较差。目前需要发展描述微型泵的理论模型,利用流体力学研究其内部流动机理。

对微型泵的流体动力学效应进行研究,了解在微尺寸下水力机械内部流体流动的特点,以及其对微型机械性能的影响,在学科上具有十分重要的意义。由于微型泵的尺寸只有毫米或微米级量级,将与传统泵内的流体动力学效应有较大不同,微型泵内雷诺数很小,离心力和惯性力很小;但此时面积力已不能忽略。同时,与传统泵内的求解边界条件也有所不同。

微型泵和微型气体机械中流动模型(也属于不可压缩流体流动范围):连续介质模型和分子运动论模型。连续介质模型又分为:欧拉模型、N—S模型和博纳(Burnnett)模型。分子运动论模型又分为:确定型MD模型、随机运动的DSMC模型和波尔兹曼模型。模型的应用范围可用努森数 Kn 表示。

无滑移边界条件流体流动的传统N—S模型仅在控制参数的一定范围内适用。这个模型需两个基本条件:①流体是连续介质。当最小体积总有100多万分子时,此条件几乎总

能满足。其中,大量的宏观变化发生于这最小体积中。②流动为近热力学平衡。

除了微型水力机械外,小型水力机械也受到研究者的相当的重视,例如,小型血液泵应用于医疗中。

仿生物水力机械是一个很有发展前途的课题。已有很多学者对于昆虫的 Weis - Forg 效应进行了研究并应用于水力机械中。水力脉冲器于 20 世纪 70 年提出研究,并有多项专利(例如:US Patent 3995972, 1976, 和 US Patent 4347036, 1982)。可以把水力振荡器用于径流式发电装置上,新型水力原动机已做了原理实验。该水力原动机结构简单,不需对河流环境进行很大改变,并利用过去所不能利用的大量径流水能。这种装置也用于泵中,并拟采用弹性材料做振荡作用板,以期利用涡作用力,产生更大的泵扬程。

现代航天和航海事业的发展,要求研究出在有限的空间高能量密度水力机械。

目前,低噪音潜艇和水路两用坦克都倾向采用喷水推进技术。为了提高速度,需要体积小,扬程高的轴流水泵,也就是高能量密度的轴流水泵。除了提高泵的转速外,还要提出新型的轴流泵,才能达到要求。

总之,新型的水力机械的水力设计就是流体力学所要解决的问题。

2) 水力机械的流动设计理论的发展对流体力学的要求。水力机械的流动设计基本包括两部分,过流通道的几何参数的选择和叶片几何形状的设计。这种流动设计,在十几年前,还基于大量试验数据基础上的经验设计方法,即所谓的“黑书”(Black Book)的设计。尤其关于过流通道的几何参数的选择。20 世纪 90 年代由于计算机技术和计算流体动力学的飞速发展,在水力机械内部三维湍流计算的基础上,预估流动性能,采用了“设计—试算—校正”的流动设计方法,即根据比较成熟的经验公式和现存的设计方法,设计出初始的水力机械,然后进行三维湍流的数值模拟。判断流动状态是否合理,不断修改设计达到满意为止。然后再通过性能试验进行验证。这种设计方法能够得到满足性能要求的水力机械,并且节约了大量的实验费用。

一个典型的例子就是大型混流式水轮机。用于长江三峡等大型水电站的高水头大型混流式水轮机,转轮直径已近 10m,容量达 70 万 kW。近年来,大型混流式水轮机的最优工作点的效率已达到 96%,看来已经达到极限水平。但是,水轮机不可能总是在最优工况点运行。在大多数情况,由于上下游水位变化,流量的变化和电网负载的变化,水轮机运行在非设计(偏离最优)工况点。此时水轮机发生空化和空蚀,以及振动。严重的情况会危及机组和建筑物的安全。近年来,采用了在水轮机内部三维湍流计算的基础上的“设计—试算—校正”的流动设计方法。设计出了全新的“X 形”转轮。“X 形”转轮不仅在最优工况点效率高,并且在非设计(偏离最优)工况点,压力脉动,机组振动和空化会大大减轻。可以说,这是水轮机设计方法和设计成果上的很大的进步。

但是,这种近十几年来所发展的水轮机、水泵、风机及其他水力机械的流动设计方法仍然属于“设计—试算—校正”的方法。这种设计方法还有很大的局限性。

①水力机械的流动数值计算方法已有一定的突破,三维湍流数值计算的结果已经比较符合水力机械的真实流动。但是流动的设计方法还基本停留在原有的经验设计方法上。

②目前,工程上所应用的水力机械的三维湍流数值计算,主要还是定常流动计算,固定部件和转动部件分开计算。水力机械的真实流动是非定常三维湍流。

水力机械的全流道和非定常三维湍流数值计算的发展,取决于计算机技术和计算流体力学的发展及其应用,也取决于湍流理论和湍流模型的进展。

③目前的水力机械的三维湍流数值计算和“设计—试算—校正”的方法,仅仅被国际上大型公司所采用,这主要是由于这种技术的采用还决定于设计人员的技术水平和对于三维湍流数值计算结果的判断。

④水力机械的真实流动是非常复杂的,尤其在非设计工况下的流动,还存在空化(水力机械)多相流等现象。

综上所述,在 21 世纪,传统的和在 20 世纪所发展的水力机械,会研究出全新的反应流体真实流动的流动设计方法。这种全新的流动设计方法应包括以下几个方面:

①水力机械的流动设计方法一定的要有所突破。会研究出和三维湍流数值计算和三维多相湍流数值计算相适应的,符合水力机械的真实流动的新的流动设计方法。

②随着计算机技术和计算流体力学的发展及其应用,及湍流理论和湍流模型的进展,工程上所应用的水力机械的非定常三维湍流数值计算和三维多相湍流数值计算,及水力机械的全流道三维湍流数值计算方法和程序会不断发展和应用。

③全新的设计和流动数值计算方法的采用及在此基础上进行水力机械性能预测方法的发展,并与机械 CAD 相结合,会形成全套的水力机械设计,虚拟实验和虚拟制造软件。

④水力机械的内部流动的量测实验的进一步发展,会量测出水力机械的内部复杂的流动现象,例如,回流和脱流,多相流动和空化,固定部件和转动部件流动间的相互作用等。根据这些试验成果,验证流动计算方法和程序。

⑤利用全新的设计和流动数值计算方法,及水力机械设计,虚拟实验和虚拟制造软件,会研制出性能良好,尤其是非设计工况性能良好的水力机械,并且会发展出新型的水力机械。

3) 水力机械的流动设计的理论与展望。目前,水力机械的流动设计的理论无论作出了什么进展,其设计的理论还停留在定常附体流动的流型设计范围。即使完成了前面所述的水力机械的流动设计方面的进展,也还是停留在定常附体流动的流型设计范围。流型是由普朗特教授首先提出。指机翼绕流的一种稳定,而且易于控制的流动,其目的是使飞机在一定的速度和迎角的条件下飞行。100 多年来,已经出现了几种机翼绕流的流型。

第一代流型——定常附体流动流型。该流型的研究导致了飞机的升空和飞行。该流型的理论认为,机翼绕流应是一种定常附体的流动,以保证机翼绕流产生足够大的升力和尽量小的阻力。从流动分离的角度上看,在机翼绕流中应力求避免大尺度的分离流动,甚至认为凡是分离流动均属有害应力求避免。从涡旋流动的角度来说,该流型就是附体涡流型。

第二代流型——定常脱体涡/混合流型。第二代定常脱体涡/混合流型突破了第一代定常附体流型中认为凡是分离流动均属有害应力求避免的观念,利用了在三机翼绕流中,由于机翼前缘三维定常分离涡层所产生的集中涡,从而可产生很高非线性升力,并且使机翼可利用的迎角范围大大扩展。这种流型是 20 世纪 90 年代高性能战斗机气动部局的基础。

第三代流型——非定常脱体涡流型。生物力学表明,很多昆虫具有在极大可利用迎角