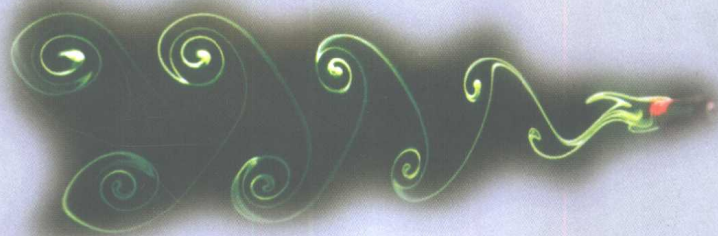


第六届全国流体力学学术会议论文集

自然、工业与流动

上海 2001

李家春 主编



气象出版社

内容简介

本书是第六届流体力学学术会议论文集,收集了大会、分会报告共 80 余篇。这些论文回顾了 20 世纪流体力学的成就,展望 21 世纪的研究方向,反映了我国流体力学界在湍流与流动稳定性,空气动力学,水动力学,多相流,非牛顿流,渗流,环境流体力学,地球物理流体力学,生物流体力学,计算流体力学,实验流体力学等分支领域的最新研究成果。

本书可供流体力学、计算数学、声学、大气动力学、航空、航天、船舶、水利、海岸、海洋、化学、石油、能源、环境、生物医学工程等领域的研究与工程技术人员,大专院校的教师和研究生阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

自然、工业与流动/李家春主编. - 北京:气象出版社,2001.4

ISBN 7-5029-3123-6

I.自… II.李… III.流体力学-学术会议-中国-文集 IV.O35-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 16128 号

自然、工业与流动

李家春 主编

责任编辑:赵大刚 林雨晨 终审:周诗健

封面设计:靳新 责任技编:王丽梅 责任校对:李幼合

*

气象出版社 出版

(北京市海淀区中关村南大街 46 号 邮政编码:100081)

北京地大彩印厂印刷

新华书店北京发行所发行 全国各地新华书店经销

*

开本:787mm×1092mm 1/16 印张:28.25 字数:720 千字

2001 年 4 月第一版 2001 年 4 月第一次印刷

印数:1~500 定价:70.00 元

第六届全国流体力学学术会议论文集

自然、工业与流动

编辑委员会

主 编 李家春

副主编 贺德馨 叶取源

委 员 (按汉语拼音顺序排次)

黄永念 李 潜 罗纪生 缪国平 张兆顺 朱自强

编辑小组

赵大刚 杨亚政 闻 玲 齐志红 汤亚南 詹世革

第六届全国流体力学学术会议

2001 年 4 月 23 日~26 日

(上海)

主办单位

中国力学学会

上海交通大学

协办单位

中国科学院力学研究所

北京大学湍流及复杂系统研究国家重点实验室

中国空气动力学研究与发展中心

交通部科学研究院河口海岸科学研究中心

第六届全国流体力学学术会议

科学委员会（按汉语拼音顺序排次）

崔尔杰 郭尚平 何友声 刘高联 吴有生
曾庆存 张涵信 周 恒 庄逢甘

学术委员会

主 任 李家春

副主任 贺德馨

委 员（按汉语拼音顺序排次）

何友声 黄永念 李 潜 鲁传敬 罗纪生 孟庆国
缪国平 魏庆鼎 叶取源 张兆顺 赵大刚 朱自强

组织委员会

主 任 叶取源

副主任 何友声 缪国平

秘书长 鲁传敬

委 员（按汉语拼音顺序排次）

陈康民 陈美发 戴世强 乐嘉钻 刘 桦 刘应中
刘宇陆 柳兆荣 陶明德 吴文权 周连第

序 言

在新世纪的第一个春天,中国力学学会、上海交通大学等单位共同在上海召开第六届全国流体力学学术会议。这次会议将回顾 20 世纪流体力学的成就,展望 21 世纪的研究方向。一个世纪以前,虽然经典的理论流体动力学已经发展得相当完美,并由 H. Lamb 将牛顿以来该学科的成就总结在“Hydrodynamics”一书中。但人们对处理真实流体现象,除了经验方法外,仍束手无策。20 世纪上半叶流体力学主要成就是应用渐近理论,结合大量风洞试验,克服了研究黏性流动与可压缩流动中的困难,突破声障和热障,使人类进入空间时代。20 世纪下半叶,流体力学为人们认识绚丽多彩的物质世界的运动规律提供了范例。由于计算与实验的理论、方法和技术的进步,不仅在湍流、涡动力学、分离流动、非线性水波等传统领域取得进展,而且促进了许多交叉的学科领域诸如:生物流体力学,地球物理流体力学,等离子体与磁流体力学,物理化学流体力学的发展。当今的科学技术进步的速度,与以往相比已不可同日而语,所以我们只能预测 21 世纪初的发展趋势。IUTAM 副主席 Leen Van Wijngaarden 在“Future trends in fluid mechanics”一文中提到:人们仍将为研究湍流而艰苦努力;对流体力学基础研究的需求会更加迫切,并深入到物理的领域;多相流的研究活动会增加,其理论分析与工程应用会更紧密地结合;与生命与环境有关的领域会得到重视;计算流体力学将在各分支领域产生重大影响,并注重其物理阐释。总之,流体力学学科的前沿领域会有新的进展,并在航空,航天,船舶,水利,海岸,海洋,化学,石油,能源,环境,生物医学工程中有广阔的应用前景,它仍将是一门富有生命力的学科。

近半个世纪以来,在老一代科学家的带领下,奠定了我国近代力学的基础。其中,学术交流的作用是无可疑的。自 1963 年起,中国力学学会流体力学专业委员会组织的前五届全国流体力学学术会议分别在上海、无锡、长沙、北京等地召开。他们在流体力学界的共同努力下,取得了成功。历次会议的文集真实地记录了我国流体力学研究的发展历程:分支学科不断增加,研究队伍不断壮大,研究手段不断进步,研究成果不断创新。38 年后,我们又回到经历改革开放后发生巨变的上海市来共同研讨新世纪流体力学的发展,这是一件很有意义的事情。本次会议我们共收到了 80 余篇学术论文,其中 13 篇为大会邀请报告,涉及湍流与流动稳定性,空气动力学,水动力学,多相流,非牛顿流,渗流,环境流体力

学，地球物理流体力学，生物流体力学，计算流体力学，实验流体力学等众多领域。为了有利于深入地讨论和切磋学术问题，我们将组织复杂流动的模拟；海洋与船舶工程；工业与环境流动；计算与空气动力学研讨会。尤其是本论文集反映了年轻一代科学家的最新研究成果，向我们展示了未来世纪的希望。

我们要感谢上海交通大学的领导、组织委员会以及为本次会议辛勤工作的同志们，在筹备与召开本次会议的全过程中，没有他们的努力，会议的顺利召开几乎是不可能的。我们要感谢上海交通大学、中国科学院力学研究所、北京大学湍流与复杂系统研究国家重点实验室、中国空气动力学研究与发展中心和交通部科学研究院河口海岸科学研究中心给予本次会议的资助。要感谢国家科技部“九五”攀登“流体和空气动力学关键基础问题研究”项目组的全力支持。本次会议学术论文的许多成果都是在国家科技部、国家自然科学基金委员会的长期资助下取得的，值此机会，谨向他们对流体力学基础和应用研究长期不懈的支持表示感谢。中国力学学会办公室的赵大刚、闻玲等同志细致工作，保证了本文集的顺利出版。我们对中国科学院力学研究所 LNM 李战华等同志为本书封面提供水洞实验照片表示感谢。我们还要再一次感谢流体力学及相关领域学术界的前辈、同仁和朋友们一贯的支持和合作，从而促进了我国流体力学研究的进展。

最后，祝大会圆满成功！

李家春

2001.2

目 次

大会邀请报告

流体力学的基础研究	周 恒 张涵信 (1)
浅水流动与污染物扩散的高分辨率计算模型	王嘉松 何友声 (6)
渗流力学几个方面的进展和建议	郭尚平 (11)
关于非定常流动的计算问题	张涵信 (23)
数值气候预测	曾庆存 (32)
Clebsch 变换与流体力学变分原理	刘高联 (36)
应用格子 Boltzmann 方法 (LBM) 模拟微机电系统 (MEMS) 中的流动	
..... 陈十一 Gary D Doolen 聂小波 (42)	
世纪之交谈流体力学实验	魏庆鼎 毕卫涛 (44)
脉动血流管壁切应力与血管重建	柳兆荣 徐 刚 (51)
走近湍流	张兆顺 崔桂香 许春晓 (57)
我国风工程研究现状与展望	贺德馨 (65)
自然环境中的流动与输运	李家春 (74)
特征张量、并矢张量和方向平均	黄永念 (82)

1 流动稳定性与湍流

Kelvin-Helmholtz 不稳定性大变形发展阶段的数值模拟*	丁志杰 张慧生 (89)
不同速度比下平面射流拟序结构发展过程的大涡模拟*	
..... 刘 奕 郭印诚 张会强 王希麟 林文漪 (95)	
剪切湍流的数值模拟及可压缩效应	傅德薰 马延文 李新亮 王 强 (99)
热湍流的直接数值模拟	酆庆增 王健平 (104)
$k-\omega$ 模型在紊流计算中的应用	杨建明 吴建华 (107)
湍流能量耗散率方程的模拟	蒋剑波 王利兵 卢志明 (113)
圆柱绕流的三维数值模拟	王亚玲 刘应中 缪国平 (118)
非线性全局及局部最优扰动和第一类可预报性	穆 穆 王家城 (123)
射流表面形状的周向变化对界面不稳定性的影响	胡明海 周哲玮 (128)
二维交通流密度波的稳定性分析	薛 郁 戴世强 谢腊兵 (133)

2 实验流体力学

热毛细对流空间实验研究*	刘秋生 周炳红 胡文瑞 (137)
涡量探头测量应用: 角区流动内涡量分布的实验研究*	
..... 林发布 尹崇禄 王凯建 魏中磊 孟庆国 赵 峰 张 军 (145)	
锯齿型扰流片对壁面压力分布的影响*	张攀峰 王晋军 李亚臣 (150)

* 文章为分会场邀请报告

水气界面下低速条带统计特征和喷射行为	王双峰	贾 复	(156)
水洞中湍流边界层流场与噪声实验研究	罗柏华	刘宇陆	(162)
双三角翼翼身组合体翼面分离流和边界层转换的测量	卞於中	桂 兵	范洁川 (167)
壁湍流温度耗散率函数标度律	姜 楠	王玉春	田 清 (171)
长输管道采用内壁覆盖层减阻试验研究			
··· 翟建军 尹崇禄 林发布 魏中磊 张伯寅 林 竹 张丽萍 秦延龙 杨晓鸿			(176)
六线涡量探针和热线风速仪的研制及其实验测量结果			
····· 魏中磊 魏庆鼎 王凯建 毕卫涛 尹崇禄 林发布 翟建军			(182)
周期性人工扰动在湍流边界层沿法向的衰减	王 昕	姜 楠	舒 玮 (187)
旋转斜压流体中急流演化的实验研究	魏 岗	苏晓冰	马晨明 (192)

3 海洋船舶工程

超大型海洋浮体水弹性响应研究概况*	崔维成	吴有生	李润培 (197)
绕二维翼型空泡流的研究*	吴 磊	鲁传敬	薛雷平 (203)
二维柱体-弹簧系统的涡激振动和声辐射*	缪国平	余志兴	刘晓宙 刘应中 (208)
水波与透水性建筑物相互作用的直接模拟			余锡平 (213)
防波堤前短峰波引起的底床失稳			林 緬 (218)
数学粗糙度函数及其降噪研究	高丽瑾	周连第	朱德祥 (223)
斜向不规则波与直墙相互作用的实验研究			
····· 李玉成 孙昭晨 董国海 徐双全 牛恩宗 毛 恺			(229)
带自由面三维船体周围黏性流场的数值模拟	张怀新	刘应中	缪国平 (235)
合成孔径雷达成像调制模式在海洋遥感中的应用	郑洪伟		沈一帆 (241)

4 水波动力学

浅滩中波在流场中绕射*	赵 明	滕 斌	柏 威 (247)
模拟孤立波在斜坡上爬高的新模型*	刘 桦	王本龙	何友声 张 近 (253)
孤立波越过斜坡式台阶时的反射	王本龙	刘 桦	何友声 张 近 (258)
浅水非线性色散波的数学模型和高精度数值方法	钦文婷		陶建华 (262)
在无黏流体中的瞬态船行波	陶明德		刘敏嘉 (267)
加速圆柱形容器中流体的非线性波动	施小民	乐嘉春	安淑萍 (271)

5 多相流与渗流

悬浮柱状体在楔形流场中运动的研究*	王叶龙		林建忠 (276)
低渗裂缝性砂岩油藏流固耦合分析*	刘建军	刘先贵	胡雅衿 张盛宗 (281)
挟带细沙运动的方腔环流*			詹杰民 (286)
泡沫在多孔介质中的流动规律及其数值模拟	程 浩		郎兆新 (290)
液固脉冲流化床数值模拟和实验研究	晋国栋	聂永生	刘大有 (295)
竖直螺旋槽管壁面液膜流动特性的研究	梅 宁	张则荣	陆建辉 (301)

带*文章为分会场邀请报告

驻波管中的颗粒聚集现象及其分析	吴 嘉 李冰航 席葆树 许宏庆 周礼蔚	(308)
应用孔隙网络模型研究致密介质中气体渗流的滑脱效应	刘庆杰 王金勋	(314)
单相流体在变形介质中的多维渗流	宋付权 张慧生 刘慈群	(318)
开口泄爆过程流动与燃烧相互作用的实验研究	胡 俊 浦以康 贾 复 万士昕	(324)

6 环境流体力学

长江口深水航道整治工程对盐水上溯的影响研究*	盛根明	(330)
珠江口盐场高度分层下的水动力特性研究*	包 芸 任 杰	(335)
纱纹床面振荡流底层大尺度涡结构演化的数值模拟及可视化研究		
.....	蒋昌波 白玉川 曾 谦	(341)
青草沙水源地库址方案数值比选	吴 卫 林顺才 刘 桦	(345)
苏州河挡潮闸冲淤试验研究	沈志刚 刘 桦 何友声	(350)
城市街道峡谷气流运动的模拟研究	吴志军 黄 震 谢 拯 毕英涛	(357)

7 计算流体力学

城市交通流一维元胞自动机模型*	董力耘 薛 郁 戴世强	(362)
用高精度紧致差分格式分块耦合求解二维黏性不可压缩复杂流场*		
.....	鲁晓东 任安禄 周永霞	(367)
分量型 TVD 格式在复杂物态方程可压缩流的应用	于 恒 张慧生	(372)
强涡-激波干扰及声场的数值模拟	马延文 傅德薰	(378)
扩展谱方法及其应用	张庆华 夏 萌 曲媛媛	(382)
机器推导在空气动力学计算中的应用	杨新铁 朱万林 罗 谦	(386)

8 空气动力学

模型昆虫翼挥拍运动中的气动力和流动结构*	唐 剑 孙 茂	(391)
飞行器超音速绕流流场气动热计算*	刘 洪 范绪箕	(395)
高超声速可压缩流一种自相似解	强希文	(400)
旋转效应对动态失速的影响	高 峰 孙 茂	(407)
蜻蜓前后翼拍打时的气动力和流动结构	兰世隆 孙 茂	(412)
微管道中稀薄气体的蠕动传输	朱光华 方 竞	(416)
二维非定常空气动力学反命题的变分原理	何吉欢	(421)
Gurney Flap 对三角翼气动特性影响的实验研究	李亚臣 王晋军	(425)
低速俯仰-滚摆耦合复杂流场测量	唐敏中 张 伟	(428)

作 者 索 引		(435)
---------------	--	-------

带*文章为分会场邀请报告

流体力学的基础研究

周 恒

(天津大学力学系, 天津 300072)

张涵信

(中国空气动力研究与发展中心, 四川绵阳 621000)
(计算流体力学国家重点实验室, 北京 100083)

摘要 从 20 世纪流体力学的发展可以看出其特点是: 主要从工程技术发展的需要提出问题, 对象是复杂的真实介质或系统。在解决问题的过程中, 又形成新的学科。而在众多的工程技术中, 又以航空航天技术的发展需要对力学发展的推动作用为最大。预计在 21 世纪, 这一趋势仍将继续一段时间。据此提出了若干亟需解决的流体力学基础问题。

关键词 流体力学, 基础问题

1 从 20 世纪流体力学与工程技术的关系看其今后的发展

要想看出一门科学的发展方向及其今后的研究重点, 应该先了解它的历史。

力学作为一门科学应该从牛顿时代算起。它和天文学一起是最早形成的两门自然科学。到 19 世纪末, 力学已发展到很高的水平。当时它主要以比较理想的模型, 如质点、质点系、刚体、理想弹性体、理想流体等为对象, 建立起了相当完善的普适的理论体系。同时也开始了与工程技术问题的结合。

20 世纪力学发展的最大特点是: 它的研究对象已不再限于理想模型, 而更多地以自然界和工程技术中必然遇到的复杂介质或系统为对象, 建立更多的力学模型, 在解决问题的过程中形成了更多的力学分支, 丰富了力学的体系, 也使力学成为众多工程和技术科学的重要基础。在 20 世纪由于力学的参与而得以形成的工程或技术科学有航空航天技术的科学、船舶工程的科学、土木工程(包含水利工程)的科学、机械工程的科学、运输工程的科学、能源技术的科学、气象科学、海洋科学、兵器工程的科学、等等。它们无疑对人类文明起了极大的推动作用。

由于力学的发展才得以实现的工程技术中的标志性成就有: 可载四百多人的喷气客机, 将人类送入太空的航天技术, 单台功率达 100 万千瓦量级的发电机组, 单跨近 2000m 的桥梁, 有抗震能力的超高层建筑, 时速达 300km 的高速列车, 巨型水利枢纽如三峡工程, 大型海上采油平台, 等等。

在各种工程技术中, 航空航天技术和力学的关系最为密切。它的每一个重大进展都依赖于流体力学的新突破。如在 20 世纪, 流体力学先后为航空技术的四次飞跃提供了科学基础。第一次解决了能不能飞的问题, 第二次解决了飞行能不能超音速的问题, 第三次解决了飞弹重返大气层或飞机做高超音速飞行时的热保护问题, 第四次解决了高速飞行时气体电离导致的通信中断问题, 同时也为隐身技术提供了新思路。

20 世纪后半叶, 战机的发展经历了四代。第一代是附体流型飞机, 第二代是带定常脱体涡的飞机, 第三代是带非常脱体涡的高机动性及高敏捷性飞机, 第四代是能超音速巡航及隐身的飞机。航天技术也已从火箭发展到航天飞机。每一次技术的飞跃, 都伴随着有流体力学的新进展。

在为工程和技术科学提供科学基础的过程中, 流体力学形成了七个分支学科, 即黏性流体力学, 空气动力学, 气动热力学, 热化学流体力学, 电磁流体力学, 稀薄气体动力学, 物理力学。20 世纪中叶, 还突破了经典声学中的发声原理, 提出了流体动力发声原理, 为工程

技术中噪声问题的解决提供了理论基础。

流体力学还为非线性科学提供了范例，如孤立波，混沌等。

由此可见，力学在 19 世纪，主要以理想模型为对象，以力求建立包罗万象的理论体系为目标，取得了很大的成就。而 20 世纪的特点则是以具体的更复杂的介质或系统为对象，从中提炼出基础问题，而在解决问题的过程中，逐步建立起新的力学分支。从学科上讲，它仍是一门基础科学，但同时它更是众多工程科学和技术科学的基础。

虽然力学在 20 世纪得到了非常大的发展，但面向 21 世纪，仍有很多重要的基础问题亟待解决。这既是科学发展本身的需要，也是工程技术进一步发展的需要。

现在人们最感兴趣的学科是所谓的新兴学科，这是很容易理解的。但是否力学这种已有很大发展的学科就不会或不需要有更大的发展了呢？显然不是如此。正是由于力学是一个历史较长的学科，已经渗透到很多工程和技术科学中，所以如果它还有未解决的重大基础问题，自然将影响到很多工程技术的发展。反之，力学在基础研究上的任何重要进展，都将推动很多工程技术的发展。必须看到，解决一个老学科的基础问题更多地具有攻坚的性质，它与新学科的基础研究更多地具有发现新规律的性质是不同的。但由于老学科影响面广，即使不是突破性进展，只要有进展，就可能产生巨大的影响。

仅以流体力学的进展对能源工业的影响为例。现全世界电网装机容量约为 40 亿千瓦，每年发电约 28 万亿度，总值约 1 万亿美元，几乎全都通过叶轮机（气轮机，水轮机）来发电。20 世纪后 50 年，由于流体力学中的湍流理论（尽管进展是缓慢的）、计算流体力学及测试技术的发展，使得叶轮机的设计得以改进，其效率提高约三分之一，这相当于使得电费每年节省约 5000 亿美元，而这里还没有考虑力学对锅炉燃烧过程效率提高的贡献。由于同样的原因，全世界仅小汽车的燃料费就可以节省约 1800 亿美元，而污染却减少了百分之九十几（化学在其中也起了重要作用）。采油工业中，由于有渗流力学的指导，使得二次、三次采油技术得以在实际中被有效应用，否则将有大量的石油无法被开采。其巨大的经济效益也是显然的。

工程、技术和自然界中具体的流动问题千差万别，它们的力学问题至今仍有很多是我们所不了解的。例如海面上水和大气的作用，大浪对船舶的作用，飞机大攻角机动时的流动规律，等等，不胜枚举。面对这么多的具体问题，如果采取零敲碎打和就事论事的办法，尽管也能解决一些具体问题，但很难取得系统的成就。要从这些复杂问题中，提炼出几个基础问题来研究。特别是选择与力学发展关系最密切的技术领域，从中提炼出基础问题。力学发展到现在，不考虑应用的可能性而去做纯粹的学术研究，一般已很难取得价值很大的成果。另一方面，仅仅着眼于解决具体的问题，不同时深入研究其机理，也不能有效推动力学的发展。

2 建议优先考虑的流体力学基础研究课题

21 世纪中，至少在一段时间内，航空航天技术发展的需要，仍将是力学发展的最大推动力。根据这样的观点，我们认为以下几个问题是关键的基础问题。

(1) 湍流及转换。这是流体力学中的一个重要而又古老的问题，一直是流体力学中心问题之一，也被认为是经典物理中留下的最大难题。它曾经吸引了不少最著名的力学和物理学家参与研究，但至今仍是流体力学中的有待进一步研究的最重要问题之一。20 世纪由于计算机和计算方法的发展，曾经有人认为力学问题几乎都可以用计算的方法解决。但实际上由于湍流问题没有解决，使得很多问题无法精确计算。固然，直到现在为止，人们都认为 N-S 方

程可以用以做湍流计算，但有些问题的计算工作量大得如果不用湍流模式就无法用现有的计算机来算。例如飞机、船舶及各种车辆的设计就是如此。由于有湍流问题而不能通过计算解决，所以还必须做费时的风洞或船池实验。不少其它重要的流动，如气轮机中的流动，也是如此，更不要说如气象这种尺度更大的问题了。

而且，湍流的复杂性超出了人们的想象。例如，由于压力梯度的变化，很多边界层中的湍流并不处于统计平衡状态，而现在的湍流理论或模式还都不能正确考虑这一因素。平均流为非定常流的流动也是这样。最近，已有人通过实验证实，湍流中如带有周期性的大尺度流动，对应的雷诺应力和变形率之间存在相位差。这一问题在涡轮机内流问题中显然也是必须考虑的新问题。

由于湍流的复杂性，寻找一种普适的湍流理论恐怕是不可能的。针对不同类型的流动寻找不同的解决方法，也许是比较可行的途径。但是，我们认为应强调的是，湍流研究的最主要目的，是使得人们可以预测湍流，或更具体地说，可以对湍流进行定量计算。

转换问题和湍流问题是密切相关的。经过多年的努力，对不可压流，其机理在原则上已清楚了。目前仍不能完全靠理论预测转换，主要是环境中扰动的特性无法预先知道。而这一点似乎也不可能完全解决，因而继续这方面的研究取得很大进展的可能性很小。今后的重点，似应放在可压缩流的转换问题上。

(2) 计算力学是 20 世纪力学发展，甚至可以说是科学发展中的最重要的进展之一。它使很多科学和技术问题得以定量计算。但是它还远不能说已经完善。即使不考虑湍流模式理论不完善造成的困难，仍有不少问题由于计算方法不够好而无法精确计算。例如为了计算有激波的流场，已经发展了不少有效的能捕捉激波的方法。但它们有一个共同的缺点，就是能高精度地计算激波的方法，在无激波区的精度都不够高（顺便提一下，在谈起计算格式的精度和分辨率时，对流场的连续区和有间断处，要用不同的标准。在连续区的精度和分辨率很容易理解。但对激波捕捉格式，精度应指在通过激波时能保证通量守恒的精度，或满足 R-H 关系式的精度。而分辨率高低则应由激波的厚度来衡量，激波薄则分辨率高。）。这使得既有激波而流场又很复杂时的精确计算很难实现，特别是非定常问题。而高速运动物体如超音速飞机或火箭周围的流场，都是这类流场。

又如，由于高速流的实验非常难做，所以超音速湍流及转换的基础研究恐怕不能依靠实验提供详细的数据。直接数值模拟将是可能提供流场详细资料的一种方法。但直接数值模拟将遇到流场中可能出现很多小激波的问题。这时有效捕捉激波和无激波区高精度高分辨率的要求就是目前还无法解决的矛盾。所以，发展既能高精度地捕捉激波，又能在流场的光滑区具有高精度和高分辨率的计算格式，是计算力学中的重要问题之一。

流固耦合问题的计算，也是一个困难问题，特别是如果固体有大变形时。

(3) 实验是任何自然科学的发展所必需的。它是发现新现象和验证理论所不可少的，也是在计算精度不能保证时必须依靠的手段。20 世纪流体力学的实验方法和手段有了很大的发展。既有地面的实验，如风洞实验，又有现场实验，如飞行实验。发展了力、热等的量测及遥测技术及流场显示技术等，对流体力学的发展起了重要的作用。

但上述各种方法，都是单点测量或整体测量，不能提供流场细节。而对基础研究来说，恰恰需要能提供流场细节的方法。因此，当前从基础研究的角度来说，最需要的是发展能对全流场，或至少是部分流场进行精细测量，给出复杂流场的流动细节的实验技术及方法。必须强调的是，实验决不是仅仅为了验证理论，或在无法计算时提供一些结果的辅助手段，它

还是发现新现象的主要手段。

(4) 旋涡和分离，是飞行器，乃至一切运动物体不可避免要遇到的问题。对飞机来说，美国的 F117 的隐身设计使得分离流在巡航时就不可避免。分离对飞行器的性能会产生重要影响。既可能是好的影响，也可能是坏的影响，关键是对其认识及控制。飞行器在大攻角时常由于背风面的非对称分离而产生非对称力矩使其失去控制。现代高机动性飞机在前机身一般都有边条或小翼等能控制分离和分离涡的装置。这是经过多年研究才逐步成熟的技术，但不同的飞机在控制这类分离的水平上有很大的差距。这反映人们对旋涡和分离的认识还很不充分。特别是对非定常流，目前甚至于连一个公认的分离判据还没有。即使知道分离位置，非定常分离的性质也显然比定常分离更为复杂。而设计高敏捷性的飞机就要处理非定常分离的问题。

旋涡看起来是一个古老的问题，但实际上对其认识仍不充分。例如，大飞机形成的翼梢涡，对位于其后下方的飞机会产生严重的干扰，因此人们曾尝试将其破碎，但经人为破碎的涡有可能重组，而其机理至今仍不甚清楚。在这里，也许可以探讨一下一些人试图通过对涡的局部控制来控制流场的想法。流场中涡的产生是流场演化的结果。涡与流场的关系通过毕奥-萨瓦尔公式联系。如果对某一涡做局部的控制，则人们往往只注意主观上想要增减的那部分涡量，而忽略了同时会产生的相反的涡量（例如，如果设想在一静止的理想流体流场中放入一个刚性涡，则在靠近涡的一薄层内，会立即形成一个具有相反涡量的涡层）。因而大多数试图通过控制涡来控制流场的人往往不自觉地仅用毕奥-萨瓦尔公式去计算主观上希望增减的那部分涡量所诱导的流场，以预测其控制的结果，而忽略了同时产生的相反的涡量的影响。这显然是不对的，因而导致往往不能得到预期的结果。上述对涡的人工破碎实际也是对涡的局部控制。可以将涡被破碎后的涡量分布设想成原来的涡量分布加上一些新的涡量，而后的总和为零。前者与原来的流场是匹配的，而后者则很快地通过涡量的扩散而失去影响。其结果看起来似乎涡又重组了。

对旋涡和分离机理的研究将对飞行器的设计提供十分有用的知识。

(5) 非定常流中还有不少问题还没有为我们所认识。鸟类和昆虫的飞行以及鱼类的游动，绝大多数都伴随着非定常流。而它们由此所具有的卓越飞行或游动性能，是人类至今还无法作到的。而且我们也不了解其规律及原因。现代飞机和导弹也经常在非定常情况下飞行，特别是在高敏捷性的要求下。。

随着微机电技术及智能材料的发展，有可能实现智能飞行。采用分布于飞行器表面的微机电元件和某些由智能材料制造的器件，与控制系统结合在一起，将有可能使飞行器外形在一定范围内随飞行条件不断变化，以获得最优气动外形。这时，即使在巡航条件下，流场就将是非定常的。因此，确定非定常流场的气动参数，特别是实时确定非定常流场的气动参数变得重要起来。这也将是一个难题。

我国在航空航天以及很多工程技术领域中和先进国家相比还有不小的差距。而 21 世纪，航空航天技术仍将是国防和国民经济必须加快发展的领域。无论是航空还是航天，都在酝酿技术上的新突破。中国作为一个推行独立自主政策的大国，绝不允许在这方面无所作为。其它工程技术领域也都将不断有新的发展。目前我国尽管在航空航天及其它工程技术上已取得很大成就，但与国际先进水平比，还有相当大的差距。这固然与我国整体的技术发展水平有关，但很重要的一点是我国的基础研究没有能为技术的发展提供必要的知识储备，力学就是其中之一。由于我们流体力学基础研究的不足，我们还不掌握复杂流场细节的量测和计算

能力；不掌握控制和利用分离、旋涡的规律性知识；不掌握湍流和转换的一些重要的规律；不掌握和增升减阻有关的规律性知识；而这些不足在很大程度上也影响了其它技术科学的发展。例如在航空航天技术上就因此缺乏原始的创新能力，遇到技术难题时也不易顺利解决。船舶技术也是如此。有时尽管我们拿到了某项先进产品的样机甚至技术资料，也无法将其很好地消化吸收，更不要说提出完全创新的技术发展思想。

当然，即使在上述几个基础研究问题上取得了进展，并不等于就能马上解决航空航天或其它工程技术中的具体问题。但如不能在这些基础问题研究上取得突破，则对一些重要的具体问题，我们甚至于会有无从下手的感觉。

3 流体力学与非线性及复杂系统科学的关系

力学作为基础科学的重要组成部分，通过其研究，不仅可以推动很多工程和技术科学的发展，还可能对非线性科学或复杂系统的科学提供有用的范例，就如在流体运动中发现的孤立波和混沌对非线性科学的形成所已起的作用那样。其实，非线性科学和复杂系统的科学虽然已引起广泛关注，但都还处在发展的很初级阶段。无论从已知的现象还是从已初步掌握的规律来看，离建立系统的理论还差得很远。从 20 世纪力学以及其它科学的发展经验来看，建立一个新的学科，不能从概念和推理出发，而必须以足够的事实为依据。因此，以已知的非线性问题或复杂系统为对象去进行研究固然能促进其发展，但更重要的是从各学科中发现更多的典型范例并加以研究。只有这样才有可能从中归纳出更多的共同规律，形成真正的科学体系。运动的流体本身就是高度非线性和复杂的系统，其基本规律自然会成为非线性科学及复杂系统科学的重要组成部分。而由于力学研究的是宏观现象，更便于直观观察，更有助于形成概念。因此其新的研究成果，一定会象孤立波和混沌所起的作用一样，继续起着推动非线性科学及复杂系统科学发展的先锋作用。

致谢 本文中提出的观点，实际是在和众多同行的交流和讨论中形成的。特别是在国家自然科学基金委员会所支持的重大及重点项目以及国家科技部支持的国家基础研究预研项目的实施过程中，更提供了实践和讨论的机会。其中庄逢甘院士的观点特别具有启发性。对所有这些同行，以及国家自然科学基金委员会及国家科技部，我们表示由衷的感谢。

浅水流动与污染物扩散的高分辨率计算模型

王嘉松

何友声

(上海交通大学动力与能源工程学院, 上海 200030) (上海交通大学工程力学系, 上海 200030)

摘要 将组合型 TVD 格式应用于守恒型的浅水方程和污染物扩散方程, 建立了二者耦合求解的高分辨率有限体积计算模型。给出了溃坝水流、明渠突扩流和污染物输运计算的典型算例, 并与实验数据或其它数值结果进行了比较, 证实了该模型的有效性, 表明它不但能处理有激波的非恒定流问题, 也能较好地计算具有任意边界的一般的浅水流动和污染物扩散问题, 为浅水流动和水环境模拟提供了精度高、稳定性好、普适性强的数值方法。

关键词 浅水流动, 污染物扩散, TVD, 有限体积, 数值模拟

引言

浅水流动在水利工程界是非常广泛的水流现象, 污染物扩散与人们日益关注的环境问题密切相关, 它们在水利和环境工程界一直受到高度重视。描述其运动特性的二维模型已比较成熟, 三维模型也有了很大发展。但鉴于目前的计算机速度和工程适用的程度, 二维模型将在实际工程中继续发挥重要作用。尽管如此, 无论是浅水流动一般问题还是污染物扩散问题, 都有进一步发展的必要, 如强潮河段与海口的潮流与污染物运移特性需要更优秀的格式来模拟、天然水域任意复杂的边界需要计算模型具有对任意边界的适应性、大面积的排污水体需由统一模式来描述, 而无需细分为近区与远区分别加以处理而导致两区衔接的困难。这就需要引入更优秀的数值方法和发展适应性更广的计算模型。TVD 格式以其精度高、激波捕捉能力强、稳定性好的特点而在空气动力学得到广泛应用, 有限体积离散方法兼有有限元和有限差分的优点因而得到迅速发展, 因此, 本文首次采用任意四边形单元基础上的有限体积离散方法结合应用高分辨率 TVD 格式来研究浅水动力学和环境水力学问题。我们知道, 水流特征影响污染物浓度分布和扩散, 但反过来如果不考虑密度变化, 污染物对水流特性没有影响, 因此耦合或非耦合求解浅水方程和浓度方程均是可行的手段。考虑到 TVD 格式应用的特点, 需对方程组作特征解耦, 为了方便本文将二者耦合求解。

1 数学模型

描述浅水流动与污染物扩散运移现象的控制方程为浅水方程和污染物浓度扩散方程, 本文将两组方程耦合求解, 组成新的方程组, 并改写成守恒形式, 为

$$Q_t + [F(Q)]_x + [G(Q)]_y = S(Q) \quad (1)$$

其中

$$Q = (h, q_x, q_y, C)^T \quad (2)$$

$$F(Q) = (q_x, q_x^2/h + 0.5gh^2, q_x q_y/h, q_x C/h)^T \quad (3)$$

$$G(Q) = (q_y, q_x q_y/h, q_y^2/h + 0.5gh^2, q_y C/h)^T \quad (4)$$

$$S(Q) = (S_1, S_2, S_3, S_4)^T \quad (5)$$

$$S_1 = 0 \quad (6)$$

$$S_2 = -\frac{\tau_{bx}}{\rho} + \frac{\partial}{\partial x} \left(2\nu_e \frac{\partial q_x}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left[\nu_e \left(\frac{\partial q_x}{\partial y} + \frac{\partial q_y}{\partial x} \right) \right] \quad (7)$$

$$S_3 = -\frac{\tau_{by}}{\rho} + \frac{\partial}{\partial y} \left(2\nu_e \frac{\partial q_y}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left[\nu_e \left(\frac{\partial q_x}{\partial y} + \frac{\partial q_y}{\partial x} \right) \right] \quad (8)$$

$$S_4 = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + S_C \quad (9)$$

式中 $\mathbf{Q}$, $\mathbf{F}(\mathbf{Q})$, $\mathbf{G}(\mathbf{Q})$, $\mathbf{S}(\mathbf{Q})$ 分别是守恒物理向量、 x -和 y -方向的通量向量及源项; h 为流动水深(m); g 为重力加速度; q_x , q_y , τ_{bx} , τ_{by} , K_x , K_y 分别为 x -和 y -方向的单宽流量 (m^2/s), 底部剪切应力及浓度扩散系数; C 为污染物深度平均浓度 (mg/l); $\nu_e = \nu + \nu_i$ 为有效应力系数, ν_i 为紊流黏性应力系数; S_C 为考虑物理、化学、生物和污染源汇等因子影响的综合项, 对于化学耗氧量 COD, 实际上表示单位时间内单位面积上污染物的负荷量。

假设由于河床产生的剪切应力起支配作用, 那么紊流黏性系数可表示为^[1]

$$\nu_i = \frac{\kappa}{6} u_* h \quad (10)$$

式中 κ 为 von Karman 常数 ($=0.41$); u_* 为剪切速度由下式给出

$$u_* = \sqrt{\frac{\tau_b}{\rho}} \quad (11)$$

τ_b 为底部剪切应力

$$\tau_b = \sqrt{\tau_{bx}^2 + \tau_{by}^2} \quad (12)$$

且

$$\tau_{bx} = \rho g h S_{fx}, \tau_{by} = \rho g h S_{fy} \quad (13)$$

摩阻定义为

$$S_{fx} = \frac{n^2 q_x \sqrt{q_x^2 + q_y^2}}{h^{10/3}}, S_{fy} = \frac{n^2 q_y \sqrt{q_x^2 + q_y^2}}{h^{10/3}} \quad (14)$$

式中 n 为曼宁粗糙系数。

对于扩散系数, 参照国内外通用的做法, 根据 Eider 经验公式^[1], 有

$$K_x = 5.93 \sqrt{g n} |q_x| / h^{1/6} \quad (15)$$

$$K_y = 5.93 \sqrt{g n} |q_y| / h^{1/6} \quad (16)$$

2 数值方法

针对任意四边形单元 i (内部区域 Ω , 边界 $\partial\Omega$), 对方程组 (1) 进行积分, 得到积分形式的方程

$$\frac{\partial}{\partial t} \iint_{\Omega} U dA + \int_{\partial\Omega} (\mathbf{F}, \mathbf{G}) \cdot \mathbf{n} dl = \iint_{\Omega} \mathbf{S} dA \quad (17)$$

式中 A 为区域 Ω 的面积, dl 为边界 $\partial\Omega$ 的弧长, $\mathbf{n}$ 为边界 $\partial\Omega$ 的外法向单位向量。边界 $\partial\Omega$ 由四条线段组成, 上式左端第 2 项可以写成

$$\int_{\partial\Omega} (\mathbf{F}, \mathbf{G}) \cdot \mathbf{n} dl = \sum_{k=1}^4 f_n^k(U) l^k \quad (18)$$