

# 湍流研究国家重点实验室研究动态

梁 彬

北京大学湍流研究国家重点实验室, 北京 100871

湍流研究国家重点实验室一直是以基础研究为主, 着眼于湍流发生发展的机制, 从理论、计算和实验方面进行研究。实验室也兼顾应用基础研究, 在环境流体力学、大气边界层模拟和风工程研究方面具有良好的基础。实验室具有完备的湍流实验研究设备, 其中许多具有国际先进水平, 这为开展国际国内合作和开放研究创造了良好的条件。实验室近年来在基础实验研究方面有以下主要进展

## 1 拟序结构的实验研究

魏中磊教授等得到重要结果:

(1) 90° 锐前缘轴对称钝体分离流在  $Re$  为  $2.8 \times 10^3 \sim 2.4 \times 10^4$  的范围内流体处于层流分离状态, 分离泡的再附长度随着  $Re$  数的增加而减小; 在  $Re$  在  $3 \times 10^4 \sim 1.0 \times 10^5$  的范围内流体处于湍流分离状态, 分离泡的再附长度基本不随  $Re$  数改变,  $X_r/D$  为  $1.4 \sim 1.5$ 。

(2) 层流分离剪切层的演化发展过程, 在一定的  $Re$  范围内, 流体流经 90° 锐前缘轴对称钝体时在其前缘发生层流分离, 分离剪切层中的  $K-H$  不稳定波逐渐失稳并卷起涡环, 涡环在运动过程中相互配对合并, 形成更大尺度的涡环结构, 涡环促进流体的横向动量交换, 当涡环的尺度与分离泡高度相当时即与壁面作用形成再附, 再附点附近涡环横截面的尺度与分离泡的高度相当。

(3) 混沌分析的结果表明, 层流分离剪切层是通过一次 Hopf 分岔和周期倍分岔途径进入混沌的。

## 2 斜向剪切对自由剪切层拟序结构影响的实验研究

魏中磊教授得出: 斜向剪切流中相干结构的形成和发展与气流速度及其夹角有很大关系; 螺旋涡结构是斜向剪切流中占主导地位的一种相干结构; 对边缘涡的详细研究十分有助于对剪切流和相干结构的理解, 它是一种很有特征的涡结构; 由于螺旋涡的影响会大大改变角区的压力分布, 并产生负涡粘性区域, 从而使湍流模式的计算中  $k-\epsilon$  模式的结果与实验值相差较远; 此外, 由于螺旋涡的存在, 也使角区的湍能和

Reynolds 应力分布发生较大变化

## 3 关于自由面附近的湍流相干结构及其识别技术的研究

我们在实验室低湍流水洞的主实验段上方, 安装一座吸式直流风洞, 形成水流速度可调节, 风速可调节的风水交界的自由面实验模型。钮珍南教授等在风-水洞实验中, 取得了一系列重要进展

(1) 用氢泡显示方法观测到在某特定条件下, 风水界面边界层出现湍斑和猝发现象, 并随着风速的变化不断扩大

(2) 采用激光流速仪系统, 测量边界层纵向边界各类信号

(3) 采用热膜风速仪, 测量风速脉动量

## 4 不可压缩流体的湍流统计理论

黄永念教授将轴对称旋涡结构的湍流统计理论进一步推广到非轴对称旋涡结构的一般情况, 给出了速度梯度各阶矩的一般公式。其中包括了国外学者得到的低阶矩的所有结果

## 5 湍流的直接数值模拟

(1) 在 1995 年的第六届国际计算流体力学会议上, 王健平博士发表了非周期性傅立叶变换方法和有限谱法的概念, 引起与会专家们的关注。此后王健平教授带领他的研究生在有限谱法的研究上又取得新的进展, 他们发现了谱函数的一个最基本的特性, 并据此提出了与之近似的函数的点谱法, 并发展成适用于湍流等各种复杂流场的方法。1997 年, 在第七届国际计算流体力学会议上, 日本名古屋工业大学的 T. Hasegawa 教授把有限谱法同谱法、高阶差分法及紧致差分法进行了比较, 确认了这一方法的优越性。著名的美国 NASA 的 H. Yee 博士再次对此方法的进步十分关注。由于王健平教授在这一领域里的突出成就, 被世界闻名的出版社 Springer-Verlag 特邀为 CFD Review 的谱方法综述文章的撰稿人。

(2) 吴江航教授近年来对湍流的新发展进行了充分的调查和预研究, 构思了湍流的均匀化理论与多重尺度的 Voronoi 自然元模型, 并已编制了相应的计算

程序, 为高精度的湍流计算探索了一条新的很有希望的途径。Voronoi cell 的基函数是最近发展起来的在极不规则的演化网格上求解偏微分方程的一种数值方法中的最重要基础。其特点是对于各维空间中任意布点都可以唯一地确定一个 Voronoi cell 网格。对应每一个结点均存在一个连续、除结点外连续可微的插值函数。这两种方法的结合为研究和计算实际流体的湍流运动提供了新的有力工具。可望改善和解决广泛工程领域中的湍流计算问题。研究工作受到国内外同行们的关注, 并多次被聘请作大会特邀报告。

## 6 非线性动力系统、混沌、分形与湍流的关系方面的研究

(1) 在拉格朗日湍流的有序拓扑结构和混沌现象的研究方面, 黄永念教授等针对一种典型的 Beltrami 流动进行了深入的分析与研究。首次找到了这种流动的一般精确解。并重点剖析了在物理空间有限区域内产生流体质点混沌运动轨道的球形涡和柱形涡两类特殊的流动, 给出了二阶球形涡内的一对封闭涡丝的精确定解, 以及这对涡丝随控制参数变化而演变的碰撞、断裂和重联过程。同时首次发现一种双环涡结构(一种亏格为3的双环面混沌流形结构)和在庞加莱截面上存在一种自相似的扁8字形岛屿结构。

(2) 在从层流向湍流过渡的分叉与混沌现象的实验研究方面, 魏中磊教授等人对静止和振动圆柱尾迹的转捩和混沌现象作了大量实验研究工作。他们发现了一些新的通往混沌的途径和失稳现象。他们还首次发现了振动圆柱后会出现同步锁频现象, 把涡脱落自然频率锁定到激振频率上。这是 Arnold 舌头的一个实例。

(3) 齐东文对 Lorenz 方程在某一分岔值的数值模拟的结果, 做了理论上的研究, 用数学方法论证了在这一分岔值可能发生各种复杂的分岔现象, 建立了混沌轨道的符号动力学描述, 并且把分岔曲线的类型与符号序列对应起来, 从而更清楚地揭示分岔行为的复杂性。相应的论文发表在国际杂志上。

(4) 在湍流流场中基本旋涡结构的拓扑动力学特性的研究方面, 黄永念教授等首次找到了一种直螺旋涡管的精确解, 并统一了计算串联或打结涡管的螺度计算公式, 改正了由于考虑问题不够仔细而造成的各种现存的错误结果。

(5) 在非线性动力体系中的斑图(时空结构)方面, 黄永念、钱敏平等在流体的“湍流、涡旋型的斑图研究”中首次找到了不可压缩流体的定常欧拉方程或不定常的 N-S 方程的轴对称流动中某一类三维旋涡的精确定解, 并发现这种三维旋涡精确定解具有离散和连续

两种可叠加性。由此可以构造出许多不同结构的轴对称螺旋型流动。并可分析它们在时间演化过程中空间旋涡拓扑结构的演化。

## 7 湍流的应用基础研究

(1) 张伯寅教授等结合复杂地形条件下的烟气扩散的研究, 在大型拖槽中进行分层流体中湍流、内波及其相互作用的实验研究, 已经取得对过山气流或绕障碍后在分层流体中形成的内波、内波破碎以及背风面湍流的相互作用的新认识。

(2) 在湍流边界层壁面突起物前方涡旋与分离结构的研究中, 魏庆鼎教授等运用流动显示方法, 完成了变  $Re$  数与变柱形状的柱前角区流动结构研究, 发现随着  $Re$  数变化, 会出现三类典型的流动。通过 LDV 测量发现, 与流谱情况相对应也有三种角区内速度脉动相关关系: 以  $F_c$  表示柱上游主涡区的脉动主频,  $F_s$  表示分离剪切层附近速度脉动主频则有:

$$(a) F_c = F_s, 2000 < Re < 5000$$

$$(b) F_c = 1/2 F_s, 5000 < Re < 8000$$

$$(c) F_c = 1/3 F_s, 8000 < Re < 20000$$

(3) 顾志福教授等进行了三圆柱绕流切换现象的风洞实验研究。国内外已在某些特定的风向角时进行了一些初步研究, 但都未提到切换现象。对于三圆柱群的切换流动现象进行研究具有学术和工程两方面的意义。目前该项目的实验部分已基本完成, 有关结果正在分析和撰写论文过程中。

## 8 现代湍流测量技术

在湍流中微小粒子跟随性的实验研究方面, 魏庆鼎教授等发现在振荡流中, 当振荡频率较高时, 离子跟随性变坏。另外, 他们在应用相关法粒子图象测速的精度问题上应用数值模拟研究了5种流动不均匀性对  $PV$  精度的影响。

## 9 其它方面的研究

丰庆增副教授研究了半无限介质内球腔突然加载产生的压缩波和从表面反射的膨胀波以及它们的合成, 给出了相应的位移和应力的波动公式, 并讨论了表面位移变化以及表面扰动波前的传播速度。这些分析有助于了解地下爆炸的地震效应。

实验室一年多来还完成了下面几项主要应用研究项目:

(1) 大亚湾核电站周围地形的核事故后果预测评价——水槽实验

(2) 黄龙体育中心主体育场篷风荷载及场内风环境模拟实验研究

(下转第188页)

# NUMERICAL ANALYSIS OF THE MECHANICS BEHAVIOR OF COMPOSITES BY FINITE ELEMENT MICROMECHANIC METHOD

Fan Daining Zhou Chuwei

Department of Engineering Mechanics, Tsinghua University, Beijing 100084

**Abstract** The developments of the computational micromechanics are characterized by the progress of the finite element computational micromechanics (FECM). This paper generalizes the achievements of FECM in the analysis of the mechanic behaviors of composites in recent decades. The models and methods of FECM are instructed, and the paper puts emphasis upon evaluating new numerical results of strength and damage of composites. Finally, the FECM application to the design of new advanced materials is prospected.

**Keywords** micromechanics, finite element, composite, stiffness, strength, damage, random distribution, material design

---

(上接第 287 页)

- (3) 风对干式冷却塔效率的不良影响及其改进措施
- (4) 输水管道振动问题
- (5) 同济大学土木工程防灾国家重点实验室桥梁风洞和大气边层风洞的研制
- (6) 国贸二期工程塔楼风压研究
- (7) 北京国际金融大厦风洞实验研究
- (8) 广东省核电站岭澳厂址大气湍流扩散的水槽模拟实验

为把实验室真正建成全国性湍流理论研究和实验的基地, 我们仍要坚持以基础研究为主, 应用基础研究为辅的方针, 继续坚持“开放、流动、联合、竞争”的运行机制, 进一步加强对外的交流与合作, 并

真诚地欢迎同行专家来室工作、讲学、交流与合作

---

北京大学湍流研究国家重点实验室

联系人: 梁 彬

地址: 北京大学力学与工程科学系, 100871

电话: 010-62756559, 010-62751992

传真: 010-62751992

E-mail: lbin@pku.edu.cn

http: turnet.mech.pku.edu.cn