

科学基金

基金重大项目“复杂气体流动中旋涡、分离的流动机理与控制”四年成果的简要总结

旋涡与分离是流体运动的一种普遍形式，其发生、发展、彼此间的相互作用及对外部作用的响应等支配着整个流动。该项目从分析复杂流动入手，采用理论分析、数值模拟和实验研究紧密结合的方法，揭示其流动机理、发展分离与旋涡特性的预示方法，探索有效的控制原理和技术，不仅具有重要的学术价值而且在航空、航天、航海等领域具有极为重要的应用前景。该项目在原来“七五”重大项目“旋涡、激波、非平衡支配的复杂流动”的部分成果的基础上，实现由二维向三维、不可压缩向可压缩、定常流向非定常流的转变，并加强理论与实验、基础性研究与应用性研究相结合。本项目分六大课题下属十三个子课题同步进行。经过四年多的研究取得了下述主要成果。

1. 旋涡和分离流动的高精度高分辨率数值模拟及分析研究

(1) 建立了高精度差分格式的稳定性与熵增原则，并发展了三阶、四阶、五阶等高阶 ENN 格式。利用这些格式解决了相关工程问题。与国外研究同步，发展了矩形/非结构网格混合网格技术，并将 NND 格式推广到混合网格计算中。在复杂外形绕流的气动方程求解中取得了满意结果。

(2) 在理论上发现涡破裂前有极限环产生；发现超声速涡与亚声速涡的发展有本质不同；并统一说明了实验中发现的多种涡破裂模式；理论说明流过对称物体不对称流动图案来自流动拓朴的结构不稳定性；推广了 Hunt 的结果得出横截面流态的拓朴规则。并证明了无逆向流时 Poincare 指数为 1，有逆向流时 Poincare 指数为 0。

2. 定常和非定常旋涡流动的直接数值模拟

(1) 为求解多尺度、具有高波数的流动，在国际上首次提出了迎风紧致和超紧致格式的数值方法，包括有三阶、五阶迎风紧致格式；六阶对称紧致差分格式（对粘性项）；时间用三步 Runge-Kutta TVD 格式；带群速度控制的五阶迎风紧致格式。对平面混合流的研究，在不同对流马赫数工况下获得了旋涡的多次合并、激波束或出现三维不稳定。研究了初始条件对拟序结构的影响。给出了 涡、马蹄涡、蘑菇云等流动图案。

(2) 球型 Couette 流的研究在不同 Re 数和初始条件下得到了不同涡结构模态，显示了流动分叉特征。

3. 动态空间化量化流动显示及其应用研究

在体视粒子图象测速 (SPIV) 方面，在 PIV 技术中，引入射影四维变换，实现了体视粒子图象测速，在国内首次实现了对一个二维截面上的瞬时三维速度的测量。

将互相关技术引入全息粒子图象测速 (HPIV)，观测视场可比国际上报导的大，且具有速

度方向识别功能.

结合一些流动实例进行了二维 PIV 应用研究,完善了二维 PIV 技术、三次自相关 DPIV 及三脉冲激光器,提高 PIV 时空分辨力,PIV 偏置技术可行性研究.

4. 激波与剪切层干扰流动机理研究

研究了不同 Re 数和不同 M 数下激波系与旋涡分离流局部相互作用,针对四种典型突起物详细测量了模型表面压力分布、表面热流率分布,纹影显示波系结构及表面油流技术显示表面流动图案.根据实验结果,分析流动机理,同时针对实验条件进行 RANS 方程的数值模拟,获得了与实验基本一致的结果,并且补充了不易直接观察的三维激波系.分析了高宽比、高度与粘性层厚度比以及楔角变化的影响.特别指出楔角 $> 20^\circ$ 分离激波与主激波相交且三维影响显著,热流峰值接近楔侧缘.

5. 剪切层、旋涡和激波的相互作用

(1) 采用改进二阶 ENO 格式,引入反扩散项处理弱间断,并用熵的不连续性来表达弱间断.通过几百个算例(无粘欧拉方程)证明冯·诺依曼结果是正确的.澄清了关于弱入射激波与楔面相互作用的特征的冯·诺依曼“谬误”.

(2) 激波扫过前后台阶的流动研究证实了旋涡源于弯曲激波产生的有旋运动与尖角固壁相互作用.

(3) 在分界面拓扑有改变的 Level set 数值方法研究中,通过对控制方程中输运项离散方法的特殊处理(仿照 ENO),省略了原来 Osher 提出的水平集在经一段时间模拟后需要重新初始化过程.

(4) 在数值模拟方面作了一些基础理论方面的工作,如:椭圆涡方法的数学证明;反应气动力学方程的 Riemann 问题解,爆燃波到爆轰波转换的机理;涡团法推广到可压情况;两种空间分步法(Godunov 和 Strang)收敛速度的讨论;及对于几种著名的一阶格式包括激波在内确为一阶格式的证明.

6. 振荡圆柱和三角翼非定常分离流流动特性与机理研究

(1) 对不可压二维非定常分离流证明了在与分离点一起移动的坐标中,该分离点为鞍点.

(2) 从低 M 数时气流温度基本不变出发导出以压力和速度为变量的 N-S 方程,提供一种新的求解思路,数值计算了振荡圆柱流动,完成了多个 Re 数,多种振荡形式,多种振荡频率下,圆柱绕流结构及受力情况的研究.揭示了频率 f , 振幅 A 对流动结构影响的复杂图象,说明了奇、偶亚谐振出现同振幅大小 $\left[\frac{A}{U}, \frac{A}{D} \right]$ 有关.

(3) 对振荡三角翼的流态及气动特性进行了实验测量,发现对后掠角为 76° 的三角翼,减缩频率 $\frac{fC_0}{U}$, 涡破裂点到翼顶点时 θ 达 110° ,而相应的静态则为 $\theta = 65^\circ$.

动态三角翼与静态三角翼相比,失速迎角有较大增加,最大升力系数有较大提高可达 20%.

(4) 在定态三角翼绕流特性实验研究中,观察到涡核中存在极限环流态,涡核截面流态上观察到周围准周期性的流态,涡核纵截面上观察到不同旋涡破裂流态的转化.

7. 有化学反应的分离流动和旋涡

(1) 利用本项目发展的差分格式,并对化学反应源项引起的刚性问题作了隐式处理.数值模拟结果证实超声速反应混合层不存在 Kelvin-Helmholtz 不稳定性.

对于时间发展的超声速(无反应)混合层,在初始扰动下 Kelvin-Helmholtz 涡将被限制在一个薄层内不会继续发展.

(2)对加强混合措施作了探索研究.提出了利用超声速旋涡在顺压区内旋涡向外旋转,增强混合提高燃烧效率;利用激波与介质交界面上的作用产生旋涡加强混合.数值模拟了 Jacob 的实验结果,证实了激波增强混合的机理.

(3)研究了改变几何参数以提高燃烧效率,此外对二维冲压式发动机等进行数值模拟计算.

(4)对随时间发展的有化学反应混合层的流动机理作了初步研究.对流马赫数的增加,将抑制混合作用.

8. 非定常分离与旋涡流动特性

(1)尾迹流动不稳定和控制研究发现只有在绝对不稳定区足够大时,流动才会整体失稳;涡的脱落和流场总体结构受扰动流场中具有最大时间增长率的不稳定模态所控制;改变尾流轴向上的速度 u 及速度剖面上 $\left(\frac{du}{dy}\right)_{\max}$ 可对尾迹中的涡进行有效控制.

(2)翼型前缘分离流动和非定常效应研究结果说明在较大上仰速率下,上翼面前缘分离推迟,尾涡很快卷成一个较大的集中涡.在这种情况下,后缘加扰动可能是控制涡的有效途径.

(3)三角翼及翼身组合体非定常气动力实验测量表明,当攻角 30° 时有非对称侧向力出现, 50° 时达到峰值,随 α 再增加,侧向力又逐渐减小.

(4)以翼型等典型物体为例,利用表面吹(吸)气进行流动控制水洞实验结果表明:当吸水孔位于 $\phi = 60^\circ$,在预计分离点前,控制分离作用明显;吸水孔位于 $\phi = 120^\circ$,在预计分离点后,控制分离作用不明显.

(5)可压缩流绕方腔流动的非定常特性数值模拟结果表明深腔-压力脉动具有较宽频谱,浅腔-压力脉动有离散频率,数值结果还揭示了方腔振荡的驱动机制和振荡频率选择的增益原则.

9. 旋涡流动特性研究

在数值方法基础理论研究方面

(1)由 N-S 方程边界条件的讨论,阐明了边界条件的重要性.对不可压流体,从二维双调和方程出发,明确了在进口处速度和压力条件的合理提法.在正确的边界条件下给出了数值模拟的结果.

(2)在数值计算方法上提出时空四阶紧致格式,五阶精度 WENN 格式,设计了三维分块耦合算法,应用于潜艇流场计算.设计了三维涡场可视化软件.

10. 旋涡的控制研究

(1)研究了衿翼和射流对绕机翼和机身旋涡流场的控制.双衿翼系的旋涡控制研究表明有俯仰运动时,这种控制也能导致在定常时(前一重大项目)的有利结果.迟滞环的形状大小与减缩频率和振幅有关.

双衿翼前缘振片有较重要的控涡作用,在一定频率下,涡脱落与振片振动之间有耦合,增大了对气动特性的影响,可以获得增升减阻,改善大后掠翼的大迎角气动特性.

射流控制实验结果表明展向吹气(平行于前缘)使脱体涡卷得更紧,延缓脱体涡的破裂,在俯仰运动时使迟滞环减小.非定常脉动吹气可在省气量的情况下,基本达到同样效果.

(2)对绕椭球体的流动(轴长比 4:1)进行了数值模拟与实验研究,结果表明当 $\alpha < 40^\circ$ 时流态对称, $\alpha < 70^\circ$ 为旋涡交替脱落非定常流态.

横截面的形状越扁平,开式分离就越提前产生,脱体涡越强,升力和抬头力矩越大.

在流动显示与图象三维重建方面得出了较好的重建三维图象.

11. 复杂非定常流动的涡结构演化和机理研究

(1) 旋转圆柱尾迹定性分析研究在局部平行流假设下研究了圆柱尾迹的整体不稳定性. 推广了 Noack 的低维 Galerkin 方法, 计算了均速旋转圆柱的绕流, 首次给出在 Re 和 $\frac{R}{v}$ 平面内尾迹 Hopf 分叉的临界曲线; 并在计算条件下得出 Strouhal 数随 Re 的变化关系.

(2) 振动圆柱尾迹稳定性分析拓展了低维 Galerkin 方法, 运用 Floquet 稳定性理论说明尾迹频率锁定是典型的参数共振现象.

(3) 在激波与希尔涡球以及与涡环的三维相互作用研究中, 得出可压缩压力与密度场, 模拟了涡的演变以及与平台激波的相互作用.

(4) 利用高分辨率有限元算法模拟了二维和三维空腔的超声速绕流 ($M = 1.5$), 探讨了振荡激波与振荡旋涡的相互作用.

12. 钝体分离和旋涡流动机理研究

(1) 圆柱尾迹转捩波特征研究方面, 提出改进的区域分解、N-S 方程有限差分与旋涡法杂交并结合多重网络法, 计算了 $Re = 3000, 5000, 9500$, 圆柱绕流获得转捩波频率随 Re 的变化为: $\frac{f_t}{f_s} \sim Re^{0.87}$ 这一在国际上新的理论结果. 这一理论规律与 Wei 和 Smith 的实验一致, 与早期的 Bloor 结果不符. 给出了 Re 数对转捩波的影响, 描述了尾迹中不同尺度旋涡非线性相互作用的转捩特征.

(2) 大尺度旋涡位错结构与尾迹转捩机制研究方面, 提出并建立了求解三维不可压开放型流动的新的精确数值方法: 建立不可压流的紧致有限差分-Fourier 谱杂交的混合格式, 利用无反射的出流边界条件和压力边界条件. 首次用数值模拟获得并显示出旋涡涡街流动中存在有大尺度似斑状 λ 型旋涡位错结构. 揭示了展向旋涡相位或频率的初始差异导致旋涡的撕裂、重联产生三维大尺度流向旋涡位错结构. 提出旋涡位错是尾迹转捩的一种新的物理机制. 与 Williamson (1992) 等的实验一致.

(3) 圆柱近尾迹绝对不稳定性存在的实验验证

设计了引入圆柱后一定位置上的(脉冲型)扰动的新方法, 通过检测下游不同位置信号增强或减弱的情况分析了绝对与对流不稳定. 实验验证在高亚临界情况下在圆柱后近尾迹 ($x/d < 5$) 存在一个绝对不稳定区和对流不稳定区 ($x/d > 5$). 在绝对不稳定区内扰动能激发旋涡脱落, 经过很长时间这种旋涡仍存在. 在国际上首次从实验上检测了尾迹流动中的不同稳定性特征.

(4) 圆柱尾迹三维转捩特征研究

流动显示发现 Re 在 180 ~ 190 之间, 极近圆柱的近尾迹开始出现流向涡的三维结构. 随 Re 增大, 三维结构流向涡的展向波长逐渐变短.

发展了混合谱-谱元方法及 PVM 系统平行算法进行三维圆柱绕流数值模拟. 描述了三维转捩的非线性发展特征.

(5) 研究了旋涡脱落抑制的新方法, 发现圆柱小棒由垂直方向插入近尾迹在 Re 为 60 ~ 1000 之间能有效抑制旋涡脱落.

13. 复杂旋涡、分离流动中的尺度效应及数值模拟

(1) 提出了流体大小尺度运动相互作用和流体运动大小尺度方程组.

利用所提出的新的方程(LSS 方程)以及 N-S 方程, 采用拟谱方法数值模拟了不可压二维槽道流和平面混合分层流动的三维时间演化. 计算表明 LSS 方程与 N-S 方程解一致. 在混合层的三维演化过程初期能量和动量传递主要由大尺度运动向小尺度运动转移, 稍后又出现反向传递. 它致使混合层中动量厚度出现波动式增长.

(2) 进一步完善了流体运动的扩散抛物化理论、方程和数值方法。

从总体上说, 重大项目的各子课题都按照原定任务中规定的研究内容和进度执行, 圆满达到了预期目标, 取得了一批可喜的成果。在分离旋涡流场特征、数值计算理论、旋涡运动理论、激波-旋涡干扰非定常分离、有化学反应的分离和旋涡运动、尾迹稳定性分析、转捩波特征及多尺度复杂流动分析、分离与旋涡机理、旋涡结构研究等多个方面提出并建立了一批在国际上有重要学术意义的创新成果。从研究成果总体上看已达到了国际先进水平的前列, 在高精度高分辨率数值模拟、复杂分离旋涡流场拓扑分析等方面属国际领先水平, 拓展了有化学反应的分离旋涡的研究领域。

该项目执行期间积极开展了与国外同行的学术交流活动, 各子课题多次参加有关的国际学术会议, 应邀在重要的国际学术大会上作特邀报告, 以及参加了中俄、中日相关专题的研讨会, 及时报告了课题的最新研究成果, 了解国外同类工作的进展情况充实自己的研究工作, 并根据国际发展作某些调整。有的还与国外同行建立了长期协作关系。这些均对项目的进展起到了积极作用。

该项目执行期间大项目负责人及各子课题负责人极其重视年青人才的培养工作。在四年多的时间里共培养了 8 位博士后, 毕业了 25 位博士生, 在读博士生 30 位, 25 位硕士生取得了硕士学位, 在读硕士生 12 位, 中青年学术带头人 40 岁以下的 10 人, 40 岁~50 岁的有 5 人。项目负责人和子课题负责人对年青人委以重任, 精心培养, 涌现了一批高水平的青年骨干, 已成为完成该项目并承担新的重大研究任务的一支不可缺少的力量。

该项目学术领导小组重视项目的管理工作, 在项目申请立项、项目执行过程中利用各种场合与各课题负责人就进行过程中的一些关键问题、疑难问题及出现的困难进行讨论, 通过年终的学术报告会, 中期的评审会及某些专题的学术讨论会, 加强学术交流。

学术领导小组积极支持课题组尽可能的参加国际学术会议, 并关心这些国际学术会议上的动向。

随着项目研究工作的逐步深入考虑到国内外同类研究工作的进展情况, 并参考中期评估时专家提出的意见, 学术领导小组对研究内容及时作出调整。

国家自然科学基金委员会数理科学部力学学科 供稿