

CSTAM-2018-A081

湍流脉动的多重层次结构¹⁾

白萱, 苏卫东²⁾

(湍流与复杂系统国家重点实验室, 北京大学工学院力学与工程科学系, 北京 100871)

摘要: 湍流多尺度脉动的结构函数 $S_p(\ell)$ 是流场中距离 ℓ 的两点脉动增量的 p 阶统计矩, 是统计理论和唯象模型的重要研究对象。Kolmogorov 理论预测在大雷诺数时 $S_p(\ell) \sim \ell^{\zeta(p)}$, 即结构函数随尺度按标度律变化, 但在实际流动中经常观测不到明显的尺度标度律, 而是表现出广义标度行为, 即不同阶的 $S_p(\ell)$ 之间及无量纲的 $S_p(\ell)$ 之间呈现幂次规律, 包括扩展自相似性 (ESS), 广义扩展自相似性 (GESS) 和层次结构性 (HS)。我们之前的研究表明 HS 是 GESS 的一个特例, 并根据层次结构的概念提出了与 GESS 完全等价、但更为深入细致地反映小尺度脉动结构的广义层次结构 (GHS) 模型 (Su et al, 2004 年中日湍流研讨会)。研究表明, 在均匀各向同性湍流, 圆管湍流, 后台阶湍流, 甚至尾流与边界层相互作用的逆梯度输运湍流和黑洞吸积盘 X 射线信号中 GHS 都很好地成立 (同上文献; 孙夏冰, 2009 年中国力学大会)。尽管如此, 热对流湍流中 GHS 的表现并不理想。为此, 本文提出了形式上更加广泛的多重层次结构模型, 即 $S_p(\ell) \sim g_0(\ell)^p g_1(\ell)^{1-\beta_1^p} \dots g_n(\ell)^{1-\beta_n^p}$ 。该模型可由 Novikov 的破碎系数模型的最一般形式的通解给出, 并且标度函数选取为 HS 的类型。该模型可以比较方便地通过多元线性回归给出其中的尺度函数 $g_i(\ell)$ 和间歇性参数 β_i , 并且当 GHS 成立时可以方便地对非线性的标度函数进行定量表达, 更重要的是也许可以刻画复杂湍流中的广义标度行为。我们发现, 对于周期盒子湍流、格栅湍流、均匀剪切湍流、圆管湍流, 特别是对于高 Ra 数低温氦气热对流, 二重层次结构已经可以近似描述多尺度脉动。对于 GHS 成立的流动, $g_1(\ell)$ 和 $g_2(\ell)$ 呈幂律关系, 但我们发现两者随尺度的变化趋势相反, 这也对应于脉动级串随机乘子负概率的存在 (Bai & Su, 2017APS-DFD)。

关键词: 湍流; 多尺度脉动; 结构函数; 层次结构; 标度律

1) 资助项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 10921202, 11221062, 11521091)

2) 通讯作者 Email: swd@pku.edu.cn

CSTAM-2018-A083

面向 E 级计算的复杂动边界不可压湍流大涡模拟¹⁾

王士召^{*2)}, 何国威^{*+}

* (非线性力学国家重点实验室, 中国科学院力学研究所, 北京 100190)

+ (中国科学院大学工程科学学院, 北京 100049)

摘要: 复杂动边界湍流的大涡模拟是湍流研究和工程应用的重要挑战。超级计算机为应对这一挑战提供了硬件基础, 但是面向超级计算机的大涡模拟方法和高效程序有待于发展。E 级计算机是指每秒可进行百亿亿次运算的超级计算机。为达到百亿亿次运算速度, 超级计算机的体系结构也越来越复杂。复杂的体系结构提高了对算法通信粒度和稳健性 (robustness) 的要求, 但降低了众多处理复杂边界的贴体网格类数值方法的并行效率。浸入边界方法 (immersed boundary method) 以其非贴体网格的特点保证了

复杂边界并行处理的高效性和稳健性，是近二十年来发展迅速的一种有利于充分发挥超级计算机性能潜力方法。但是，浸入边界方法需要的较大的网格量，并且需要在边界附近插值或重构流场。近壁插值或重构流场对湍流的影响和并行效率尚待系统地检验。本文发展了针对 E 级计算的浸入边界方法，实现了不可压流动方程的万核级百亿网格点量级的高效并行计算，并通过圆柱群和核反应堆燃料棒束等复杂边界湍流标准算例检验了我们发展的方法和程序，得到了预期的结果。

关键词：大涡模拟；浸入边界方法；并行计算；复杂动边界

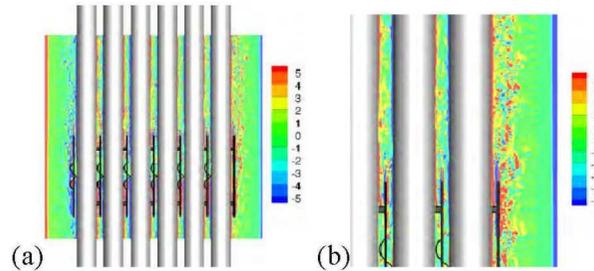


图 1. 燃料棒束绕流的大涡模拟，(a) 局部切片内的涡量场，(b) 固定格架附近的涡量场。计算中采用 87 亿网格点，6.5 万 CPU 核心。

1) 国家自然科学基金项目 (91752118, 11672305, 11232011, 11572331)、中科院战略性先导科技专项 (XDB22040104)、中科院前沿科学重点研究计划 (QYZDJ-SSW-SYS002) 和 973 项目 (2013CB834100: 非线性科学) 资助。

2) 通讯作者 Email: wangsz@lnm.imech.ac.cn

CSTAM-2018-A084

逆压梯度边界层的稳定性分析与转捩控制¹⁾

王亮²⁾, 李惊春, 符松

(清华大学航天航空学院, 北京 100084)

摘要：等离子体流动控制是基于等离子体气动激励的新型主动流动控制技术，具有响应时间短、激励频带宽等显著技术优势，在改善飞行器空气动力特性方面具有广阔的应用前景，已成为国际上等离子体动力学与空气动力学交叉领域的前沿研究热点。其中从介质阻挡放电 (DBD) 等离子体气动激励特性，等离子体气动激励在控制边界层方面具有很大的潜力。本文针对具有逆压梯度的平板边界层，采用敏感性分析、非线性抛物化稳定性方程 (NPSE) 等方法，探讨了 DBD 等离子体激励器对流动转捩过程的控制效果。

本文采用来流速度 20m/s、湍流度 0.24% 的标准算例。获得基本流场后，首先使用线性稳定性 (LST) 方法求解出拇指曲线，比较不同模态的扰动发展速度，选择其中扰动发展最快、最不稳定的模态为目标模态。之后，使用敏感性分析目标模态在空间及时间上敏感性因子的分布情况，给出等离子体激励器的安装策略。通过 NPSE 分别给出等离子体激励器在不同工作电压 (8-11kV) 及不同安装位置 (流向位置 $x = 250, 300, 350, 400$ mm) 下的扰动能量发展情况，并与基本流进行了对比。

关键词：介质阻挡放电等离子体激励器；敏感性分析；稳定性分析；转捩控制

1) 资助项目：(国家自然科学基金项目 11572177, 11572176)

2) 通讯作者 Email: wangliang12@tsinghua.edu.cn