[GKS在自适应笛卡尔网格上的方法探究]

[胡荣海][1] [马强][2]
[1][四川大学] [2][四川大学]

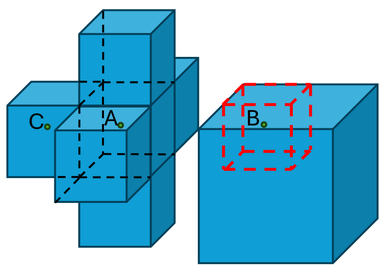
一、自适应笛卡尔网格

自适应笛卡尔网格因其不受复杂几何外形约束、可完全自动生成等显著优势，为高效自动化流体仿真提供了可行方案，但也带来了两个问题。

自适应加密 → 悬挂单元 → 构造等距模板 → 反距离加权最小二乘法

插值基函数

$$p=(1,x,y,z)^T$$

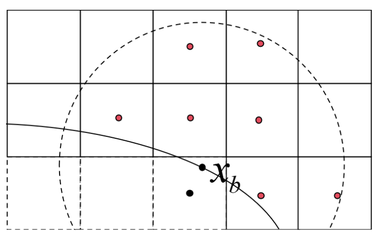


插值模板示意图
红色虚方块（等距模板）
蓝色方块（插值模板）

非贴体 → 切割单元 → 构造虚拟单元 → 带限制的加权最小二乘法

权重

$$w=\exp\left(-\frac{\pi^2}{4}\| \mathbf{x}_i-\mathbf{x}_b\|^2 \Big/ d^2\right)$$



红色（模板点）
x_b （插值点）

二、气体动理学格式（GKS）

气体运动
- 微观：牛顿运动定律
- 介观：玻尔兹曼方程及其简化方程
- 宏观：纳维-斯托克斯方程

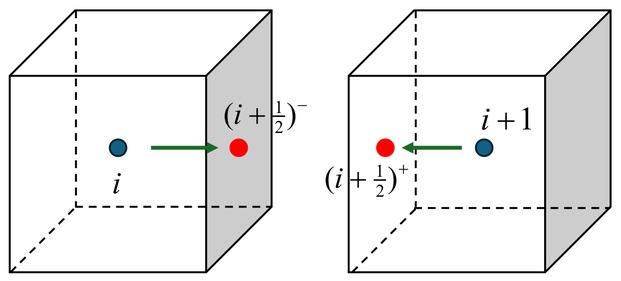
GKS求解介观BGK方程

$$\frac{\partial f}{\partial t}+\mathbf{u}\frac{\partial f}{\partial \mathbf{x}}=\frac{g-f}{\tau}$$

τ 是弛豫时间
g 是局部平衡态

↓ 假设每个单元服从麦克斯韦分布

重构半点的分布函数



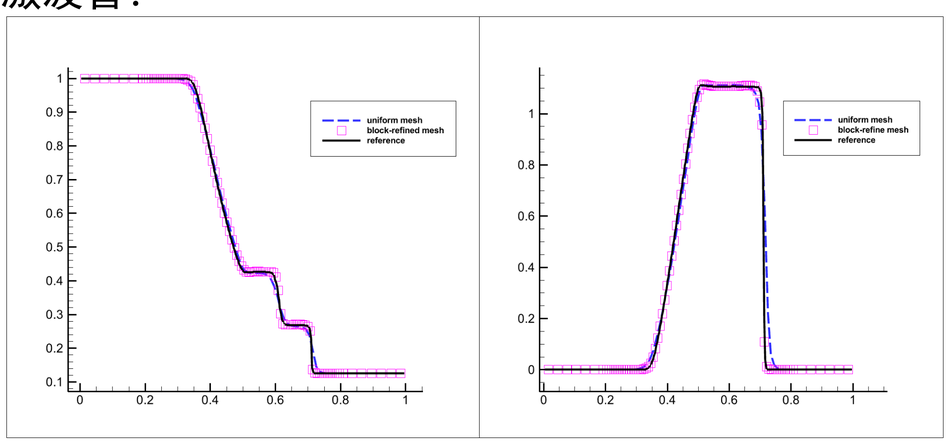
蓝点（服从麦克斯韦分布）
红点（利用蓝点重构分布函数）

↓ 对半点的分布函数求矩

得到界面的宏观通量

三、算例

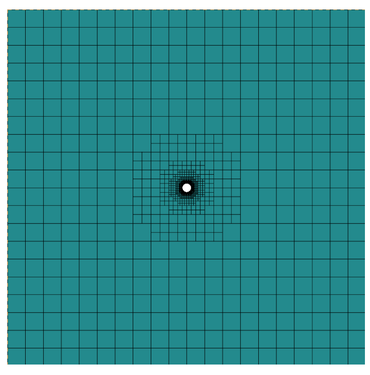
Sod激波管：



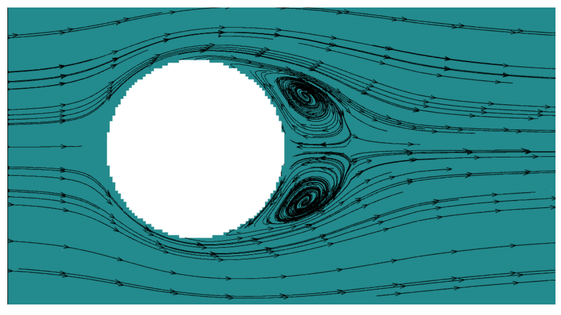
蓝色虚线（100×10×10的均匀网格）
紫色方块（ 以100×10×10为背景网格，在激波区域块加密 ）
黑色实线（参考解）

相较于100×10×10的均匀网格，块加密后能更好的捕捉到激波

亚声速圆球绕流：来流马赫数0.2，雷洛数30



在圆球附近做几何自适应：
背景网格20×20×20，最大加密层级7



圆球附近流线图

四、结论

	本文	Johnson[4]
分离长度	0.42	0.41
涡心坐标	(0.616,0.299.0.299)	(0.640,0.211.0.211)

该方法能定性的给出合理的流场结构，但涡心坐标与文献相比仍存在一些差异

总体而言：本文将自适应笛卡尔网格与GKS算法耦合，Sod激波管验证了其可行性，三维结果揭示了本文在边界处理的薄弱之处；此外本文仅在物面附近进行几何自适应，后续工作将聚焦于处理虚拟单元并引入流场自适应，以捕捉更精确的流场结构。

Reference:
[1] Xu, Kun. "von Karman Institute for Fluid Dynamics Lecture Series 1998-03." (1998).
[2] Zhu, Yajun, et al. "Unified gas-kinetic wave-particle methods. II. Multiscale simulation on unstructured mesh." *Physics of Fluids* 31.6 (2019).
[3] Chen, Songze, Kun Xu, and Zhihui Li. "Cartesian grid method for gas kinetic scheme on irregular geometries." *Journal of Computational Physics* 326 (2016): 862-877.
[4] Johnson, T. A., and V. C. Patel. "Flow past a sphere up to a Reynolds number of 300." *Journal of Fluid Mechanics* 378 (1999): 19-70.
[5] Roos, Frederick W., and William W. Willmarth. "Some experimental results on sphere and disk drag." *AIAA journal* 9.2 (1971): 285-291