基于几何感知 Hilbert 曲线分区的笛卡尔网格求解器

李奇[1]　徐春光[1,*]

[1] 中山大学航空航天学院，深圳 518107

一、核心算法：权重预测与预拆分

先预测各背景单元的细化工作量，再拆小超重单元，沿 Hilbert 顺序按权重分配给各进程。

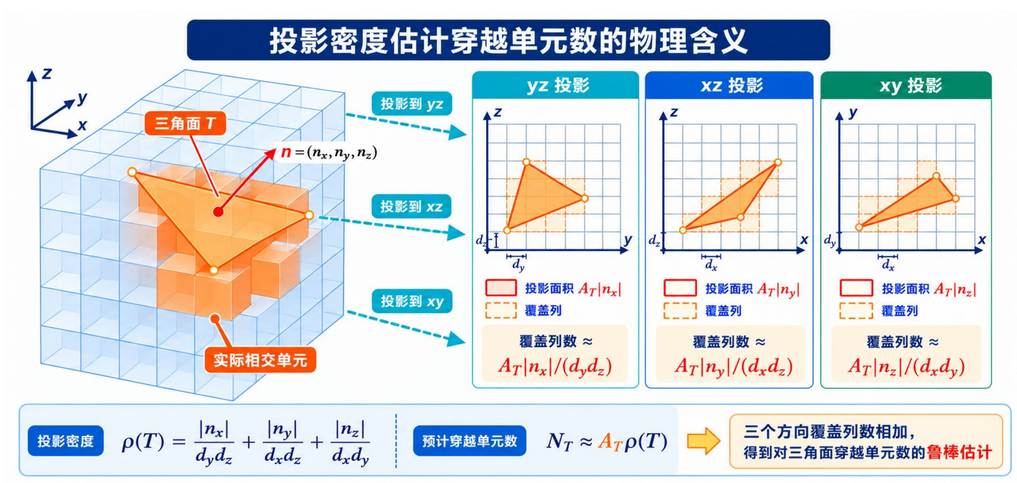


图1a　三方向投影覆盖量相加，估计细化后的单元数，再经 Cfit 标定为背景单元权重。

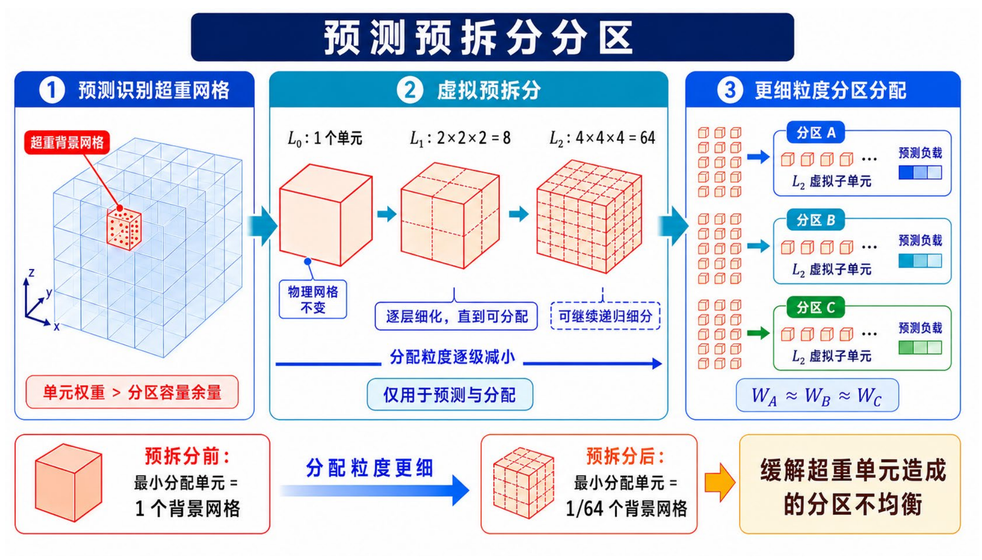


图1b　拆小超重单元，保持父子权重守恒。1/64 为两级拆分示例，实际按阈值递归。

二、几何感知分区与通信优化

2:1 平衡通信时间减少 78.67%

远程请求数减少 57.14%，本地传播先收敛，再按目标层级执行跨进程修正。

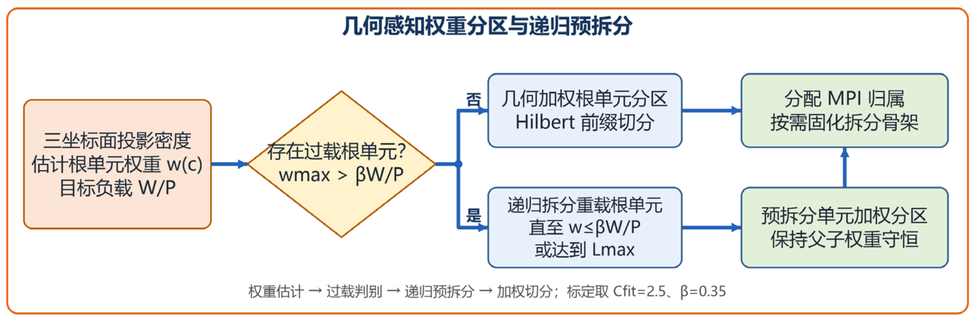


图2　在拓扑扩张前估计工作量并拆分重载根单元，保持父子权重守恒。

球体消融：Cfit = 2.5，β = 0.35，64 核

初始分区	分区单元数	最大负载因子	生成时间 / s
均匀分区	216	32.051	30.252
仅几何加权	216	8.018	13.952
几何加权 + 预拆分	**944**	**1.217**	**7.199**

相对仅加权分区，预拆分使首次迁移量减少 93.0%，并突破完整根单元不可分的粒度限制。

三、大规模生成性能与研究结论

1024 核：133 s 生成 15 亿以上网格

另以约 3.5 亿网格测试强扩展，1024 核网格生成效率为 72.13%（以 128 核为基准）。

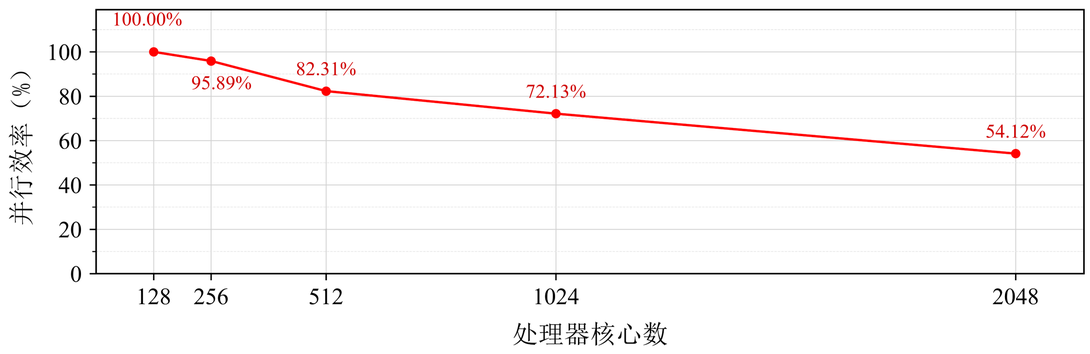


图3　固定约 3.5 亿网格的生成强扩展，效率取整展示。2048 核约 54%，通信开销占比上升。

求解扩展性（独立测试）：1.65 亿网格、100 步，1024 核相对 128 核的并行效率为 62.6%。

研究结论

1. 几何预测与预拆分缓解首次加密负载不均。
2. 局部优先平衡显著降低跨进程通信开销。
3. 千核测试支持十亿级网格的高效生成。
4. 气动力求解误差低于5%。

四、典型流动验证结果

NASA Configuration 1：Ma = 3.95，1.65 亿网格

Navier–Stokes 方程，SST 湍流模型与壁面函数



图4 α = 4°：左为表面压力系数，右为马赫数云图。

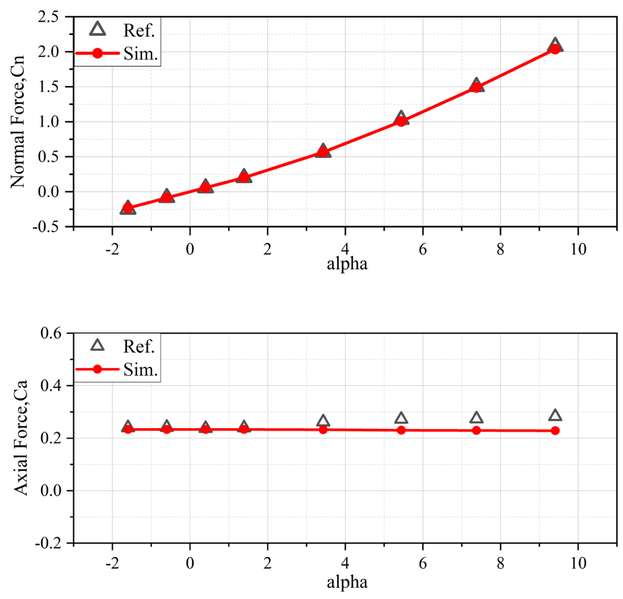


图5　法向力 Cn 与轴向力 Ca 对比。Ref. 为风洞试验，Sim. 为本方法。

气动力整体精度误差<5%，法向力总体吻合，高攻角轴向力偏低。