推进减层法：非结构边界层网格的自适应生成算法

张庆东[1]　刘杨[1]　滕凡[1]　张勇杰[1]　庞宇飞[1]

[1] 中国空气动力研究与发展中心计算空气动力研究所，四川绵阳 621000

一、研究背景

推进层法（ALM）在尖角、凹槽、窄缝等复杂几何特征附近容易产生负体积和高扭曲度单元。现有方法在碰撞检测效率、系统化层回退、以及四边形/混合网格支持方面存在明显不足。亟需一种能随几何特征自适应分布层数的算法。因此本文发展推进减层法(ALRM)。

核心目标：消除负体积，实现附面层层数随几何特征自适应分布，支持三角形/四边形/混合网格，同时提升生成效率。

二、ALRM算法框架

① **法向平滑** 普通点、特征点、鞍点、边界点四级计算法向，逐层平滑。

② **安全距离预计算** AABB树射线求交，预计算顶点安全推进距离 d_{safe} 。

③ **逐层推进** 五准则逐项判定，触发即停止面片的推进。

④ **碰撞减层与层回退** 八叉树相交检测，穿透面片逐层回退。

⑤ **过渡单元组装** 根据面片推进层数 $\boldsymbol{l_f}$ ，计算活跃点组装混合过渡单元。

逐层推进 $\boldsymbol{P_v^{(k)} = P_v^{(k-1)} + n_v^{(k-1)} h_k}$

三、五准则层次化停止机制

① **射线安全距离** 沿法向射线预计算首交距离，累计推进超过$\alpha \cdot d_{safe}$即停止。每间隔5层更新一次安全距离。

② **各向同性** 推进单元达到各向同性时(平均边长$\bar{\boldsymbol{d}}_{\boldsymbol{f}}^{(\boldsymbol{k-1})}$小于层高$\boldsymbol{h_k}$时），即停止，但至少保持5层黏性层。

③ **层差扩散平滑** 按照各向同性比率限制相邻面片层数差，过渡区尺度平缓变化，但不能超过最大层数$\boldsymbol{N}$。

④ **凹特征边角度** 凹特征边两侧二面角过小即停止，避免推进前沿重叠。

⑤ **单元体积** 候选单元有向体积非正立即回退，杜绝负体积。

四、全局碰撞检测和层回退

射线安全距离能够避免绝大多数的网格碰撞，但是对于某些区域还是不能做到绝对的无碰撞，因此在所有单元停止推进后，对前沿面做全局碰撞检测是非常有必要的。采用八叉树加速的方法进行碰撞检测。

假设面片f的推进层数为$\boldsymbol{l_f}$，迭代持续进行碰撞检测，每次回退1层，然后重新构建前沿面再次执行碰撞检测，形成一个迭代压缩过程。令t为迭代次数：

$$\boldsymbol{l_f^{(0)} = l_f, l_f^{(t+1)}} = \begin{cases} \boldsymbol{l_f^{(t)} - 1}, & \text{检测到相交} \\ \boldsymbol{l_f^{(t)}}, & \text{未检测到相交} \end{cases}$$

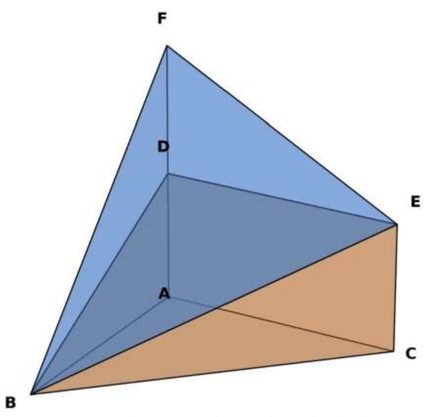
五、混合过渡单元组装

对于面片f，根据当前层$\boldsymbol{i}$和每个顶点推进层数$\boldsymbol{l_v^{final}}$的关系，可定义顶点活跃状态指示函数：

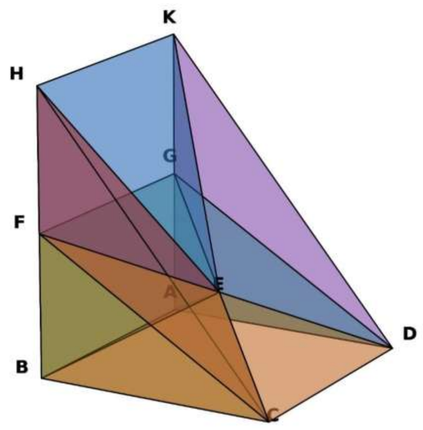
$$s_v(\boldsymbol{i}) = \begin{cases} \boldsymbol{1, i < l_v^{final} - 1} \\ \boldsymbol{0, i \geq l_v^{final} - 1} \end{cases}, \boldsymbol{S(i)} = \sum_{\boldsymbol{v \in f}} s_v(\boldsymbol{i})$$

对于三角形面片f，可根据活跃顶点为1,2,3分别生成四面体、金字塔和三棱柱单元。对于四边形面片f，可根据活跃顶点为0,1,2,3,4分别生成多个四面体和金字塔组成的混合单元以及六面体单元。

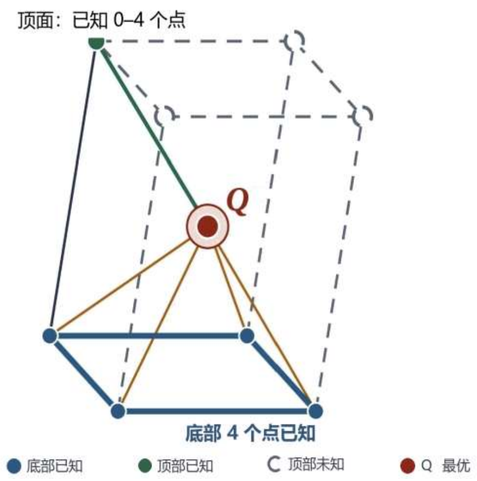
其中四边形单元涉及到金字塔单元顶点的求取，本文采取正体积的约束线性规划求得最优解。已知四边形底四个点，和$n(n = 0,1,2,3,4)$个推进前沿点。最优Q定义为在所有有效对角线组合上最大化最小几何间隔的 Chebyshev 中心：



三角形面混合过渡单元



四边形面混合过渡单元（2个活跃顶点）



金字塔顶心Q计算示意图

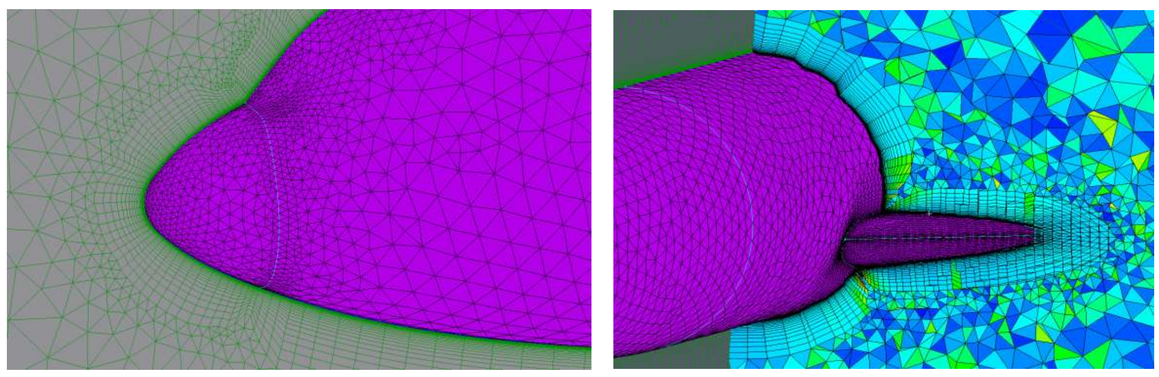
Q与底面、顶面和侧面6组四边形面共计64种对角线组合组成四面体，要求体积均为正：

$$\max_{m,Q,t} \boldsymbol{t} \ \boldsymbol{s.t.} \hat{\boldsymbol{n}}_{\boldsymbol{j}} \cdot (\boldsymbol{A_j - Q}) \geq \boldsymbol{t}$$

其中$\hat{\mathbf{n}}_{\mathbf{j}}$为三角形法向，$\mathbf{A_j}$为单元顶点，$j \in \mathcal{J}_m$，$\mathcal{J}_m$为第$m$种对角线下的参与约束三角形集合。

六、数值实验

将本方法与推进层法(ALM)，构造法（CM）及商业软件Pointwise的附面层网格进行效率、最小体积和网格质量（等角扭曲度）进行对比，我们将等角扭曲度大于0.98的单元记为低质量单元。其中ALM不适用四边形表面网格，CM在具有四边形表面网格模型中均生成失败。



F6边界层网格

模型	表面网格单元类型	方法	生成时间	最小体积	低质量单元比例
OV102	三角形	CM	28s	2.07e-14	0.95%
		ALM	63s	-2.90e-07	0.60%
		Pointwise	59s	3.60e-06	0.32%
		ALRM	22s	2.86e-06	0.13%
航空飞机	四边形占优	Pointwise	19min 2s	4.30e-07	0.072%
		ALRM	9min 5s	8.79e-05	0.061%
某导弹	四边形	Pointwise	74s	7.18e-05	0.81%
		ALRM	38s	4.46e-06	0.58%

经实验证明ALRM在效率和网格质量方面均表现优异，将生成的网格使用NNW-FlowStar进行气动参数计算，计算结果与Pointwise高度吻合，升力系数和阻力系数误差范围均在5%以内。

七、结论

本文核心贡献体现在三个方面：1)建立了五个层次化的质量控制准则，不仅提升了网格质量，还使得大多单元在即将碰撞前就停止推进；2)推进后八叉树加速全局碰撞检测，避免层层检测的效率消耗；3)发展层差扩散平滑并配套完整的混合单元组装模板。