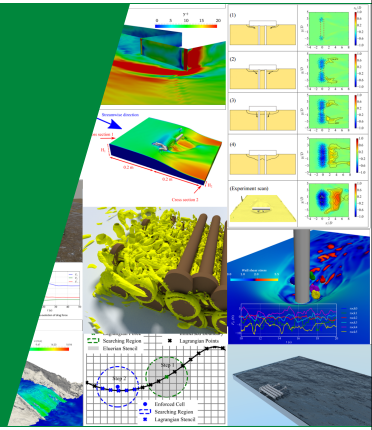
中国农业大学　流体机械与流体工程系

2024年春季《计算流体动力学编程实践》

第三章 网格处理
blockMesh



徐云成

✉ycxu@cau.edu.cn

2024 年 2 月 27 日

本节课内容要点

- 计算网格分类和要求
- OpenFOAM® 中的网格工具
- 如何使用`blockMesh` 划分网格

计算网格 Computational mesh

- 一个计算网格是指用来描述模拟中的空间域，包括边界离散和空间离散
- 生成网格并不简单
- 生成网格通常占用整个CFD模拟一半以上的精力

网格结构

网格类型：

- 结构化网格 structured mesh
- 非结构化网格 unstructured grid
- 重叠网格 Overset meshes

从另一个角度：

- 贴体网格 body-fitted mesh
- 浸没边界法 immersed boundary method on a fixed background mesh
- 无网格法 mesh-less methods, e.g., LBM, SPH

网格要求

如何定义网格尺度和质量？

- 最重要的是你希望通过模拟捕捉的物理现象！
- 哪些区域需要考虑加密网格？
  - 物理问题最关心的区域
  - 物理量变化较快（梯度较大）的区域
- 维度：二维还是三维？
- 对于湍流模型，你想要如何模拟？你能调用多少计算量？
  - DNS, LES or RANS
  - 如何处理大梯度（sharp gradient）区域，比如无滑移壁面？

典型的网格划分过程

- 准备几何造型
  - CAD
  - 三维扫描+数字化处理
- 几何造型的加工处理
  - 加密处理（Refinement）通过插值等方法
  - 简化处理（Coarsening）去除一些不必要的细节
- 在网格生成软件中导入几何表面网格（surface mesh）
  - 表面网格通常会用来定义需要模拟的边界,会分为不同边界（patches），比如进口、出口等
  - 一般而言，如果几何造型比较简单，可以在网格生成软件中直接生成表面网格
- 生成体网格
  - 计算域内的网格单元不会发生重叠
  - 网格位置决定了离散解所在位置, 因此在网格划分前，需要对求解域有一些认识（预判）
  - 网格质量对于模拟结果非常重要

常用的网格质量指标

- 网格纵横比 Cell aspect ratio
- 非正交性 Non-orthogonality
- 畸变率/偏斜率/偏度 Skewness

faceSkewness 代码案例


```
Foam::scalar Foam::primitiveMeshTools::faceSkewness
(
    const primitiveMesh& mesh,
    const pointField& p,
    const vectorField& fCtrs,
    const vectorField& fAreas,

    const label facei,
    const point& ownCc,
    const point& neiCc
)
{
    vector Cpf = fCtrs[facei] - ownCc;
    vector d = neiCc - ownCc;

    // Skewness vector
    vector sv =
        Cpf
      - ((fAreas[facei] & Cpf)/((fAreas[facei] & d) + rootVSmall))*d;
    vector svHat = sv/(mag(sv) + rootVSmall);

    // Normalisation distance calculated as the approximate distance
    // from the face centre to the edge of the face in the direction
    // of the skewness
    scalar fd = 0.2*mag(d) + rootVSmall;
    const face& f = mesh.faces()[facei];
    forAll(f, pi)
    {
        fd = max(fd, mag(svHat & (p[f[pi]] - fCtrs[facei])));
    }

    // Normalised skewness
    return mag(sv)/fd;
}
```

mesh:网格
p:网格顶点
fCtrs：面（face）中心点
fAreas:面的面积向量
facei:面序号
ownCc:该面相邻的一个网格中心点
neiCc:该面相邻的另一个网格中心点
mag():magnitude
&:点乘
rootVSmall:非常小的值10^{-38}??
face:面顶点序号

动网格 Dynamic Mesh

- 静网格 Static
- 动网格，网格变形(mesh deformation)或拓扑结构发生变化(topological change)
  - 几何结构在计算域内移动
  - 适应性网格加密/稀疏化(Adaptive mesh refinement/coarsening)
    - alpha、梯度、模型误差
- 常见的拓扑结构变化
  - 接触边界、脱离边界（Attach/detach boundary）
  - 增加、移除网格层（Cell layer addition/removal）
  - 滑移界面(Sliding interface)

OpenFOAM® 中的网格工具

- 源代码在 applications/utilities/mesh
- 网格划分 applications/utilities/mesh/generation:
  - blockMesh
  - snappyHexMesh
  - foamyMesh
- 网格转换 applications/utilities/mesh/conversion):
  - fluent3DMeshToFoam
  - fluentMeshToFoam
  - star4ToFoam
  - gambitToFoam
  - cfx4ToFoam
  - ansysToFoam

OpenFOAM® 中的网格工具

- 源代码在 applications/utilities/mesh
- 网格划分 applications/utilities/mesh/generation:
  - blockMesh
  - snappyHexMesh
  - foamyMesh
- 网格转换 applications/utilities/mesh/conversion):
  - fluent3DMeshToFoam
  - fluentMeshToFoam
  - star4ToFoam
  - gambitToFoam
  - cfx4ToFoam
  - ansysToFoam

OpenFOAM® 中的网格工具

- 源代码在 applications/utilities/mesh
- 网格划分 applications/utilities/mesh/generation:
  - blockMesh
  - snappyHexMesh
  - foamyMesh
- 网格转换 applications/utilities/mesh/conversion):
  - fluent3DMeshToFoam
  - fluentMeshToFoam
  - star4ToFoam
  - gambitToFoam
  - cfx4ToFoam
  - ansysToFoam

OpenFOAM® 中的网格工具

- 其他网格工具 applications/utilities/mesh/advanced:
  - refineWallLayer加密靠近边界的网格
  - collapseEdges整合同一条线上的边
  - ...
- 网格处理 applications/utilities/mesh/manipulation:
  - checkMesh检查网格质量
  - topoSet在cellSets/faceSets/pointSets进行操作（创建create、删除delete、反选invert、剔除subset）
  - refineMesh通常是根据topoSet得到的cellSets进行网格加密
  - transformPoints平移translate、旋转rotate、缩放scale网格顶点
  - moveMesh网格在边界上根据某种既定方式进行变形
  - createPatch根据已选择的边界面（boundary face）创建新的计算边界（patch）

OpenFOAM® 中的网格工具

- 其他网格工具 `applications/utilities/mesh/advanced`:
  - `refineWallLayer`加密靠近边界的网格
  - `collapseEdges`整合同一条线上的边
  - ...
- 网格处理 `applications/utilities/mesh/manipulation`:
  - `checkMesh`检查网格质量
  - `topoSet`在cellSets/faceSets/pointSets进行操作（创建create、删除delete、反选invert、剔除subset）
  - `refineMesh`通常是根据topoSet得到的cellSets进行网格加密
  - `transformPoints`平移translate、旋转rotate、缩放scale网格顶点
  - `moveMesh`网格在边界上根据某种既定方式进行变形
  - `createPatch`根据已选择的边界面（boundary face）创建新的计算边界（patch）

OpenFOAM® 中的网格工具

- OpenFOAM® 还有很多用来处理表面几何数据（surfaces，such as STL, OBJ）的工具
- 源代码在applications/utilities/surface:
  - surfaceCheck 检查表面网格的拓扑结构，包括相邻网格的法方向
  - surfaceConvert 转换格式
  - surfaceTransformPoints translate、rotate、scale表面网格顶点
  - surfaceSmooth 对网格顶点使用Laplacian smoothing，进行平滑处理
  - surfaceCoarsen 稀疏化处理

更多工具可见

https://cfd.direct/openfoam/user-guide/v8-standard-utilities/#x14-1110003.6.2

OpenFOAM® 中的网格存储方式

- constant/polyMesh中常见文件:

  boundary faces neighbour owner points

points

```
882
(
    (0 0 0)
    (0.005 0 0)
    (0.01 0 0)
    (0.015 0 0)
...
)
```

faces

```
1640
(
    4(1 22 463 442)
    4(21 462 463 22)
    4(2 23 464 443)
    4(22 463 464 23)
    ...
)
```

owner

```
1640
(
    0
    0
    1
    1
    ...
)
```

neighbour

```
760
(
    1
    20
    2
    21
    ...
)
```

- 同一个face，owner序号要小于neighbour
- face法向是远离owner

OpenFOAM® 中的网格存储方式

- constant/polyMesh中常见文件:

  boundary faces neighbour owner points

points

```
882
(
    (0 0 0)
    (0.005 0 0)
    (0.01 0 0)
    (0.015 0 0)
...
)
```

faces

```
1640
(
    4(1 22 463 442)
    4(21 462 463 22)
    4(2 23 464 443)
    4(22 463 464 23)
    ...
)
```

owner

```
1640
(
    0
    0
    1
    1
    ...
)
```

neighbour

```
760
(
    1
    20
    2
    21
    ...
)
```

- 同一个face，owner序号要小于neighbour
- face法向是远离owner

Boundary


```
3
(
    movingWall
    {
        type            wall;
        inGroups        List<word> 1(wall);
        nFaces          20;
        startFace       760;
    }
    fixedWalls
    {
        type            wall;
        inGroups        List<word> 1(wall);
        nFaces          60;
        startFace       780;
    }
...
)
```


如何使用blockMesh划分网格

- blockMesh是OpenFOAM® 中最基础的网格划分工具，主要是通过`system/blockMeshDict`一个脚本字典文件(dictionary file)生成网格，主要是在`constant/polyMesh`中输出`points`，`faces`，`cells`，`boundary`。
- 基本原理：将计算域划分为一个或多个六面体块（hexahedral blocks），体块的边可以是直线(straight line)、弧线(arc)、样条曲线(spline)，每个方向上定义网格划分密度。
- 一个体块一般可以由8个顶点组成，也可以少于8个顶点（比较少见，一般不考虑）

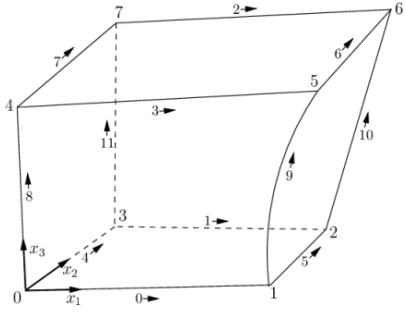
blockMeshDict


```
convertToMeters 1;

vertices
(
    ...
);

blocks
(
    ...
);

edges
(
);

patches
(
   ...
);

mergePatchPairs();
```

- convertToMeters 顶点坐标缩放因子: 0.001 scales to mm
- vertices 顶点坐标: (0 0 0)
- edges 用于arc、spline边: arc 1 4 (0.939 0.342 -0.5)
- block 顶点序号组合和网格尺寸:
  `hex (0 1 2 3 4 5 6 7)(10 10 1)simpleGrading(1.0 1.0 1.0)`
- patches 边界条件(patches):
  `patch inlet ( (4 7 3 0) )`
- mergePatchPairs 需要合并的边界条件，暂不考虑

blockMeshDict — vertices


```
vertices
(
    ( 0    0    0   )    // vertex number 0
    ( 1    0    0.1)    // vertex number 1
    ( 1.1  1    0.1)    // vertex number 2
    ( 0    1    0.1)    // vertex number 3
    (-0.1 -0.1  1   )    // vertex number 4
    ( 1.3  0    1.2)    // vertex number 5
    ( 1.4  1.1  1.3)    // vertex number 6
    ( 0    1    1.1)    // vertex number 7
);
```



blockMeshDict — edges


```
edges
(
    arc 1 5 (1.1 0.0 0.5) // 顶点1和顶点5之间的1个插值点
);

edges
(
    arc 1 5 25 (0 1 0) // 25 degrees, y-normal
);
```

还有spline，polyLine，BSpline，对应多个插值点

blockMeshDict — blocks


```
blocks
(
    hex (0 1 2 3 4 5 6 7)    // vertex numbers
    (10 10 10)               // numbers of cells in each direction
    simpleGrading (1 2 3)    // cell expansion ratios
);
```

另一种:

```
edgeGrading (1 1 1 1 2 2 2 2 3 3 3 3)
```


blockMeshDict — blocks


```
blocks
(
    hex (0 1 2 3 4 5 6 7) (100 300 100)
    simpleGrading
    (
        1                   // x-direction expansion ratio
        (
            (0.2 0.3 4)     // 20% y-dir, 30% cells, expansion = 4
            (0.6 0.4 1)     // 60% y-dir, 40% cells, expansion = 1
            (0.2 0.3 0.25) // 20% y-dir, 30% cells, expansion = 0.25
        )
        3                   // z-direction expansion ratio
    )
);
```


blockMeshDict — boundary


```
boundary                // keyword
(
    inlet               // patch name
    {
        type patch;     // patch type for patch 0
        faces
        (
            (0 4 7 3)   // block face in this patch
        );
    }                   // end of 0th patch definition
    walls               // patch name
    {
        type wall;      // patch type for patch 1
        faces
        (
            (0 1 5 4)
            (0 3 2 1)
            (3 7 6 2)
            (4 5 6 7)
        );
    }
    ...
);
```

```
boundary
(
    patch inlet
    {
        (0 4 7 3)
    }
    wall walls
    {
        (0 1 5 4)
        (0 3 2 1)
        (3 7 6 2)
        (4 5 6 7)
    }
    ...
);
```


blockMeshDict — boundary


```
boundary                // keyword
(
    inlet               // patch name
    {
        type patch;     // patch type for patch 0
        faces
        (
            (0 4 7 3)   // block face in this patch
        );
    }                   // end of 0th patch definition
    walls               // patch name
    {
        type wall;      // patch type for patch 1
        faces
        (
            (0 1 5 4)
            (0 3 2 1)
            (3 7 6 2)
            (4 5 6 7)
        );
    }
    ...
);
```

```
boundary
(
    patch inlet
    {
        (0 4 7 3)
    }
    wall walls
    {
        (0 1 5 4)
        (0 3 2 1)
        (3 7 6 2)
        (4 5 6 7)
    }
    ...
);
```


blockMeshDict — cyclic boundary


```
left
{
    type            cyclic;
    neighbourPatch  right;
    faces           ((0 4 7 3));
}
right
{
    type            cyclic;
    neighbourPatch  left;
    faces           ((1 5 6 2));
}
```

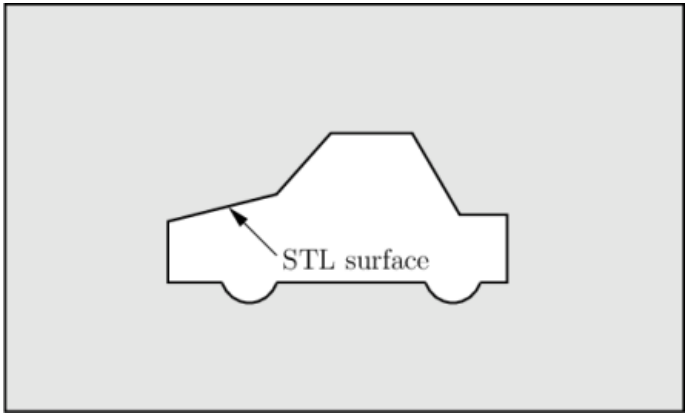



图: 几何表面与计算域

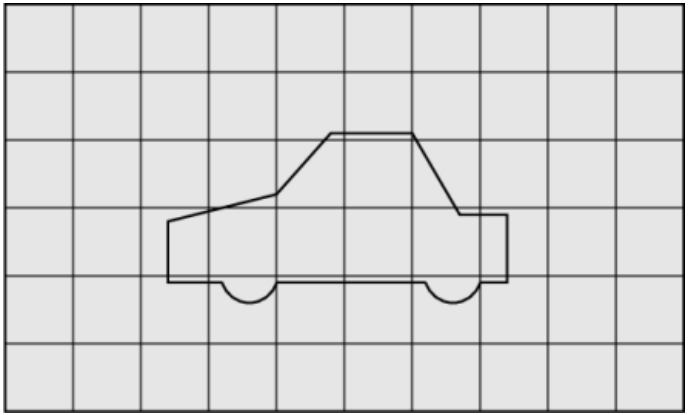


图: 生成背景网格（一般用blockMesh）

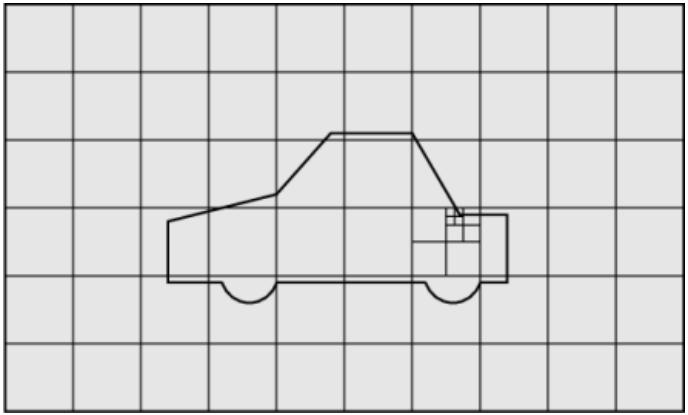


图: 对于局部细节进行加密 feature edge

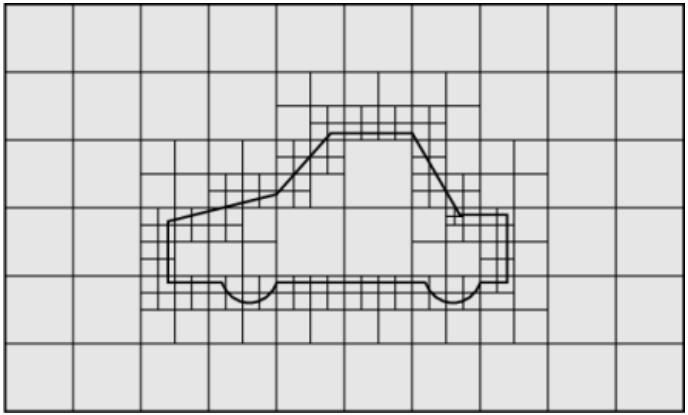


图: 识别出相交网格并进行加密

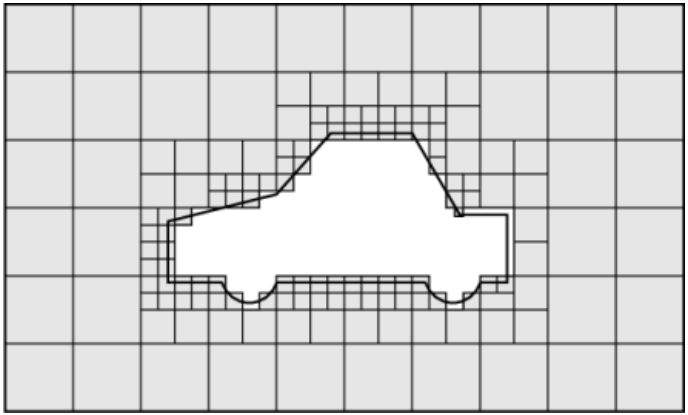


图: 移除几何内部网格

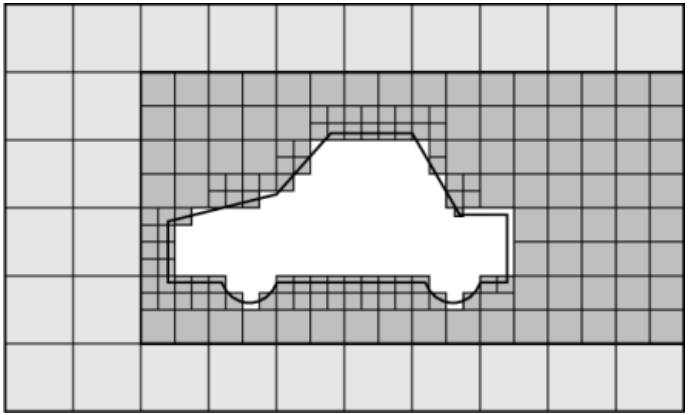


图: 对指定区域进行加密

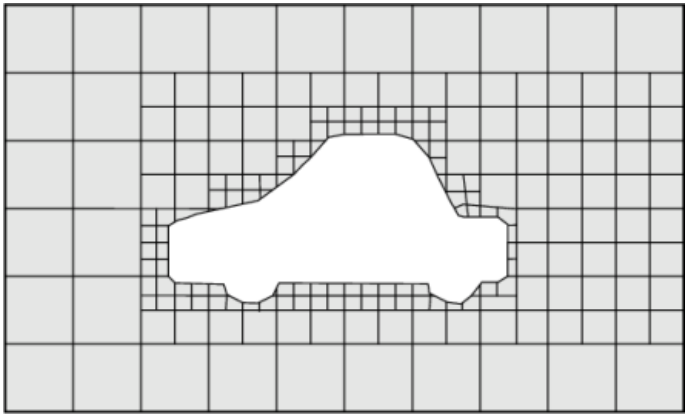


图: 移动边界网格顶点，使之与表面几何网格重合

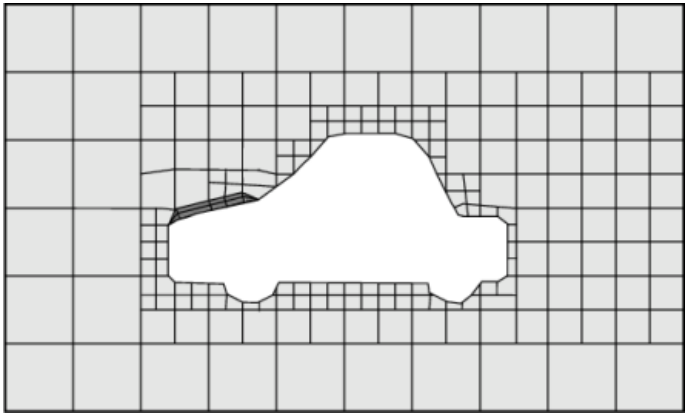


图: 生成边界层网格（阴影部分）

实操练习

- 更新gitee.com代码平台
  `git fetch --all; git pull`
- 演示3个block情况的blockMeshDict
- 解读snappyHexMesh

Thank you.

欢迎私下交流，请勿私自上传网络，谢谢！