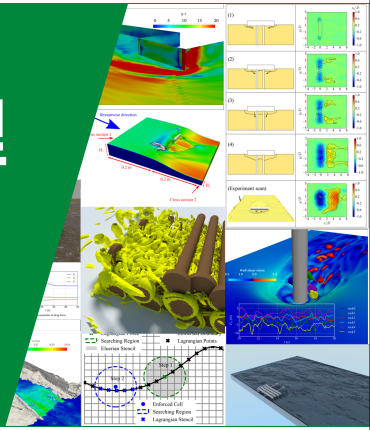
中国农业大学　流体机械与流体工程系

2023 年春季《计算流体动力学编程实践》

第六章 计算结果后处理

徐云成

✉ycxu@cau.edu.cn



2023 年 4 月 3 日

OpenFOAM® 中的后处理

- ParaView — GUI 形式，易于操作
  - 绘制云图、矢量图、流线图
  - 二次加工数据
  - 输出图片、动画、视频
- 命令行后处理
  - 计算结束后的处理，例如`simpleFoam -postProcess -func Lambda2`
  - 计算进行中 (run-time) 的处理
- 第三方软件进行后处理
  - 使用 Tecplot 直接读取算例数据
  - 使用 matlab python 等对后处理得到的数据进行再处理

屏幕输出信息的解读


```
Time = 287

smoothSolver:  Solving for Ux, Initial residual = 0.000119475, Final residual = 1.19332e-05, No Iterations 5
smoothSolver:  Solving for Uy, Initial residual = 0.000988822, Final residual = 6.43953e-05, No Iterations 6
GAMG:  Solving for p, Initial residual = 0.00147862, Final residual = 0.00014116, No Iterations 3
time step continuity errors : sum local = 0.00595802, global = -0.000643205, cumulative = 1.18609
smoothSolver:  Solving for epsilon, Initial residual = 0.000135797, Final residual = 8.98303e-06, No Iterations 3
smoothSolver:  Solving for k, Initial residual = 0.000217753, Final residual = 1.3218e-05, No Iterations 4
ExecutionTime = 4.72 s  ClockTime = 6 s
```

图: simpleFoam 二维计算屏幕输出信息

- 对于系数矩阵 $A\mathbf{x} = \mathbf{b}$，残差为 $\mathbf{r} = \mathbf{b} - A\mathbf{x}$
- 定义归一化因子 $n = \sum (|A\mathbf{x} - A\overline{\mathbf{x}}| + |\mathbf{b} - A\overline{\mathbf{x}}|)$
- 归一化的残差值为 $r = \frac{1}{n} \sum |\mathbf{b} - A\mathbf{x}|$

- `Initial residual`: 使用上一个时间步的 $\mathbf{x}$ 和本时间步的 A、$\mathbf{b}$ 进行计算
- `Final residual`: 使用本时间步的 $\mathbf{x}$、A、$\mathbf{b}$ 进行计算
- 一般使用`Initial residual` 曲线来判断稳态计算是否收敛
- `No Iteration` 指系数矩阵计算迭代次数

continuity errors


```
{
    volScalarField contErr(fvc::div(phi));

    scalar sumLocalContErr = runTime.deltaTValue()*
        mag(contErr)().weightedAverage(mesh.V()).value();

    scalar globalContErr = runTime.deltaTValue()*
        contErr.weightedAverage(mesh.V()).value();
    cumulativeContErr += globalContErr;

    Info<< "time step continuity errors : sum local = " << sumLocalContErr
        << ", global = " << globalContErr
        << ", cumulative = " << cumulativeContErr
        << endl;
}
```

- Local continuity error （绝对值）: $\epsilon_{\text{local}} = \Delta t < |\nabla \phi| >$
- Global continuity error: $\epsilon_{\text{global}} = \Delta t < \nabla \phi >$
- $< x >$ 指网格单元体积平均

src/finiteVolume/cfdTools/incompressible/continuityErrs.H

如何得到残差变化图?

方法一 使用 foamLog

- 将计算屏幕输出保存至文件，例如`simpleFoam>log.simpleFoam`
- 运行`foamLog log.simpleFoam`，可以得到`logs/`，该文件夹内包括

```
clockTime_0       epsAvg_0          epsMax_0          k_0          pFinalRes_0  Ux_0          UyFinalRes_0
contCumulative_0  epsilon_0         epsMin_0          kFinalRes_0  pIters_0     UxFinalRes_0  UyIters_0
contGlobal_0      epsilonFinalRes_0 executionTime_0   kIters_0     Separator_0  UxIters_0
contLocal_0       epsilonIters_0    foamLog.awk       p_0          Time_0       Uy_0
```

其中`Ux_0`是 U_x 的（初始）残差

如何得到残差变化图?

方法二 使用 run-time function object

- 在system/controlDict 中加入

```
functions
{
#includeFunc  residuals
...  other function objects here ...
}
```

- 计算会实时输出结果至postProcessing/residuals/0/residuals.dat
- 使用以下命令可以实时看到残差变化

```
foamMonitor -l postProcessing/residuals/0/residuals.dat
```

postProcess

- 到底有多少这样的后处理函数 function object?
  `postProcess -list`
- 上述命令列出的函数可以在以下位置找到
  `$FOAM_ETC/caseDicts/postProcessing`
- 后处理函数种类包括:

```
combustion  fields     forces  lagrangian  numerical  probes    surfaceFieldValue
control     flowRate   graphs  minMax      pressure   solvers   visualization
```


场计算 field

CourantNo

库郎数，要求 ϕ(phi) 进行计算
可用以下三种方式进行计算

- `simpleFoam -postProcess -func CourantNo`
- `postProcess -func CourantNo`
- 在`system/controlDict` 中加入

```
functions
{
#includeFunc  CourantNo
...  other function objects here ...
}
```


场计算 field

Lambda2

计算速度梯度张量对称和非对称部分平方和的第二特征值，用于表征流场结构

MachNo

从U 场计算马赫数

PecletNo

从phi 场计算佩克莱数

Q

计算速度梯度张量的第二不变量，用于表征流场结构

R

计算雷诺应力张量（6 个变量）

场计算 field

add

两个或多个场相加

- `simpleFoam -postProces -func "add(U,U)"`
- `postProcess -func "add(U,U)"`
- `#includeFunc add(U,U)`

输出变量名`add(U,U)`，此外`subtract` 是两个场相减

age

计算流体颗粒从进口到该位置时间，也被成为“空气龄”

components

输出分量场，例如`U` 可分为`Ux`、`Uy`、`Uz`

场计算 field

ddt

计算某个变量的时间梯度 Eulerian time derivative

div

计算某个变量的散度 divergence

grad

计算某个变量的梯度 gradient

enstrophy

通过速度场计算涡度拟能 $\xi = 0.5|\nabla \times \mathbf{u}|^2$

场计算 field

fieldAverage

计算时间平均，尤其适用于 LES 中的 run-time process，例如

`#includeFunc fieldAverage(U, p, prime2Mean = yes)`

运行 `foamInfo fieldAverage` 选择第 2 个可得

```
fieldAverage1
{
    type            fieldAverage;
    libs            ("libfieldFunctionObjects.so");

    writeControl    writeTime;

    restartOnRestart    false;
    restartOnOutput     false;
    periodicRestart     false;
    restartPeriod       0.002;

    base            time;
    window          10.0;
    windowName      w1;

    mean            yes;
    prime2Mean      yes;

    fields          (U p);
}
```

```
Usage
    \table
        Property          | Description                | Required | Default
        type              | type name: fieldAverage    | yes |
        restartOnRestart  | Restart the averaging on restart | no  | no
        restartOnOutput   | Restart the averaging on output  | no  | no
        periodicRestart   | Periodically restart the averaging | no  | no
        restartPeriod     | Periodic restart period    | conditional |
        fields            | list of fields and averaging options | yes |
    \endtable
```

场计算 field

flowType

输出速度场的流动状态：-1 是旋转流动，0 是剪切流，1 是平面流

$$\lambda = \frac{|\mathbf{D}| - |\Omega|}{|\mathbf{D}| + |\Omega|}$$

λ 是流动状态指标，$\mathbf{D}$ 是速度梯度张量的对称部分`symm(gradU)`，Ω 是速度梯度张量的偏对称部分`skew(gradU)`

可在`src/OpenFOAM/primitives/Tensor/TensorI.H` 中找到

$$\text{symm}(\mathbf{a}) = \begin{bmatrix} a_{11} & 0.5(a_{12}+a_{21}) & 0.5(a_{13}+a_{31}) \\ & a_{22} & 0.5(a_{23}+a_{32}) \\ & & a_{33} \end{bmatrix}$$

$$\text{skew}(\mathbf{a}) = \begin{bmatrix} 0.0 & 0.5(a_{12}-a_{21}) & 0.5(a_{13}-a_{31}) \\ 0.5(a_{21}-a_{12}) & 0.0 & 0.5(a_{23}-a_{32}) \\ 0.5(a_{31}-a_{13}) & 0.5(a_{32}-a_{23}) & 0.0 \end{bmatrix}$$

场计算 field

flowType

输出速度场的流动状态：-1 是旋转流动，0 是剪切流，1 是平面流

$$\lambda = \frac{|\mathbf{D}| - |\Omega|}{|\mathbf{D}| + |\Omega|}$$

λ 是流动状态指标，$\mathbf{D}$ 是速度梯度张量的对称部分`symm(gradU)`，Ω 是速度梯度张量的偏对称部分`skew(gradU)`

可在`src/OpenFOAM/primitives/Tensor/TensorI.H` 中找到

$$\mathsf{symm}(\mathbf{a}) = \begin{bmatrix} a_{11} & 0.5(a_{12}+a_{21}) & 0.5(a_{13}+a_{31}) \\ & a_{22} & 0.5(a_{23}+a_{32}) \\ & & a_{33} \end{bmatrix}$$

$$\mathsf{skew}(\mathbf{a}) = \begin{bmatrix} 0.0 & 0.5(a_{12}-a_{21}) & 0.5(a_{13}-a_{31}) \\ 0.5(a_{21}-a_{12}) & 0.0 & 0.5(a_{23}-a_{32}) \\ 0.5(a_{31}-a_{13}) & 0.5(a_{32}-a_{23}) & 0.0 \end{bmatrix}$$

场计算 field

mag

计算某个变量的大小 magnitude

magSqr

计算某个变量的平方 magnitude-squared

randomise

给某一个变量加扰动

```
postProcess -func "randomise(p,magPerturbation=0.1)"
```

scale

使某个变量增大一定倍数，只能是标量 (volScalarField)

```
postProcess -func "scale(U,result=U_scaled,scale=1.2)"
```

场计算 field

shearStress

计算剪切应力场，输出张量（6 个分量）

shearStress

计算剪切应力场，输出张量（6 个分量）

turbulenceFields

计算湍流相关变量，R 是雷诺应力

`simpleFoam -postProcess -func "turbulenceFields(fields=(R devSigma))"`

等同于`simpleFoam -postProcess -func R`

turbulenceIntensity

计算湍流强度，由于涉及湍流模型，必须要用`<solver>`

场计算 field

vorticity

计算涡强度，必须要用<solver>

wallShearStress

计算壁面剪切力，必须要用<solver>

writeCellCentres

输出网格中心坐标以及坐标三个分量，有助于进一步后处理

writeVTK

输出 VTK 格式的数据postProcess -func "writeVTK(objects=(U p nut))"

yPlus

计算壁面第一层网格的无量纲尺度，必须要用<solver>

流量计算 flow rate

flowRatePatch

利用phi 计算边界上流量postProcess -func "flowRatePatch(name=inlet)"

力的计算

forcesIncompressible

计算不可压流体壁面所受力，包括三个方向的压力和粘滞力 `simpleFoam -postProcess -func "forcesIncompressible(patches=(lowerWall),rhoInf=1000)"`

forceCoeffsIncompressible

计算相关升力、阻力系数，还可以设置面积`Aref`，速度`magUInf`，升力方向`liftDir`，阻力方向`dragDir`

forcesCompressible

计算可压流体壁面所受力

forcesCoeffsCompressible

计算相关升力、阻力系数

最大值最小值

cellMax

输出网格中心的最大值postProcess -func "cellMax(fields=(U p))"

cellMin

输出网格中心的最小值

faceMax

输面的最大值

```
postProcess -func "faceMax(fields=(U p),regionType=patch,name=inlet)"
```

faceMin

输面的最小值

最大值最小值

minMaxComponents

输出最大最小值以及所在的网格序号和空间位置

```
postProcess -func "minMaxComponents(fields=(U p))"
```

minMaxMagnitude

输出最大最小值（模）以及所在的网格序号和空间位置

```
postProcess -func "minMaxMagnitude(fields=(U p))"
```

压力相关

pressureDifferencePatch

计算两个边界上的平均压力以及他们的差 `simpleFoam -postProcess -func "pressureDifferencePatch(patch1=inlet,patch2=outlet)"` 其实是

subtract+areaAverage
$FOAM_ETC/caseDicts/postProcessing/pressure/pressureDifference.cfg

压力相关

pressureDifferencePatch

计算两个边界上的平均压力以及他们的差 `simpleFoam -postProcess -func "pressureDifferencePatch(patch1=inlet,patch2=outlet)"` 其实是

subtract+areaAverage
`$FOAM_ETC/caseDicts/postProcessing/pressure/pressureDifference.cfg`

Probes

probes

输出离定义点最近的网格中心值postProcess -
func "probes(fields=(U p),probeLocations=((1 0 0)(2 0 0)))"

```
probes
{
    // Where to load it from
    libs            ("libsampling.so");

    type            probes;

    // Name of the directory for probe data
    name            probes;

    // Write at same frequency as fields
    writeControl    timeStep;
    writeInterval   1;

    // Fields to be probed
    fields          ( U p );

    probeLocations
    (
        ( -0.0206 0 0.0 )        //
        (0 -0. 0.0)  //
        (0.1 0. 0.0)    //
        (0.29 0 0.0)         //
    );
}
```

Probes

internalProbes

输出离定义点最近的网格中心值postProcess -
func "probes(fields=(U p),probeLocations=((1 0 0)(2 0 0)))"

```
probes
{
    // Where to load it from
    libs            ("libsampling.so");

    type            probes;

    // Name of the directory for probe data
    name            probes;

    // Write at same frequency as fields
    writeControl    timeStep;
    writeInterval   1;

    // Fields to be probed
    fields          ( p U );

    probeLocations
    (
        ( -0.0206 0 0.0 )        //
        (0 -0. 0.0)  //
        (0.1 0. 0.0)   //
        (0.29 0 0.0)         //
    );
}
```

Thank you.

欢迎私下交流，请勿私自上传网络，谢谢！