

COMSOL Multiphysics®

计算流体力学（CFD）建模（在线课程）

Part IV

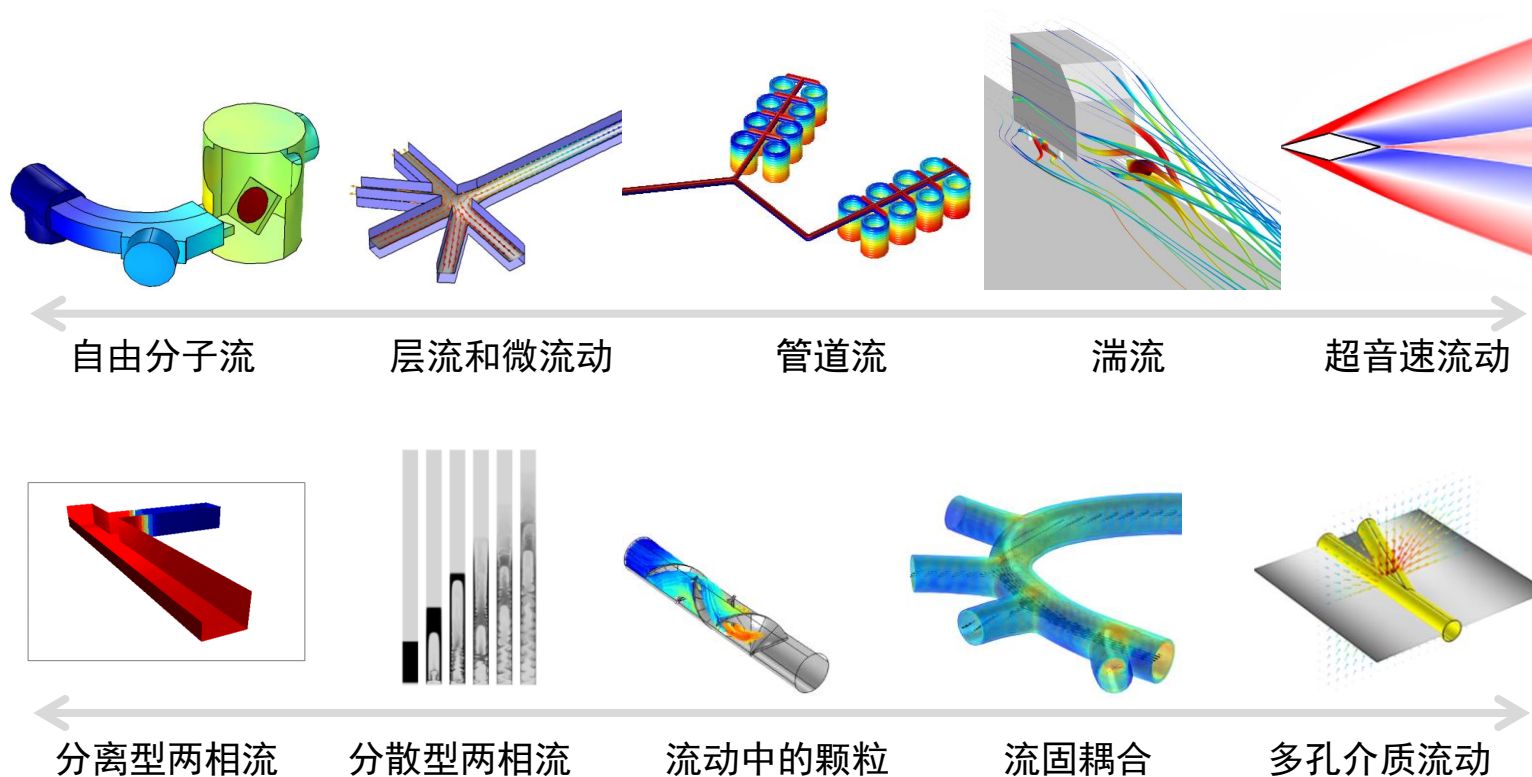
COMSOL 中国

张照

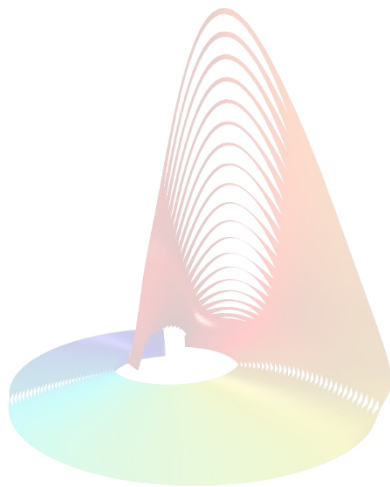
应用工程师

主要内容

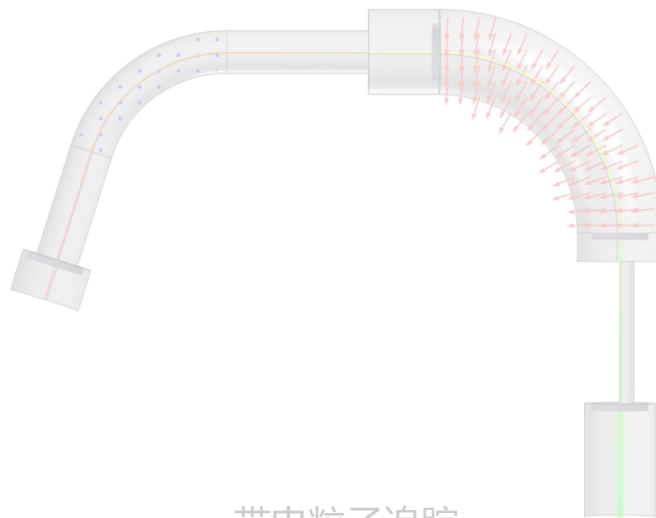
- 流体方程及边界条件
- 蠕动流、层流和非牛顿流体建模
- 湍流建模
- 旋转机械内流体流动
- 薄膜流与管道流
- 多孔介质与地下水流动
- 两相流仿真
- 流体中的粒子追踪
- 非等温流建模
- 高马赫数流动
- 多物理场模型：反应流，流固耦合建模



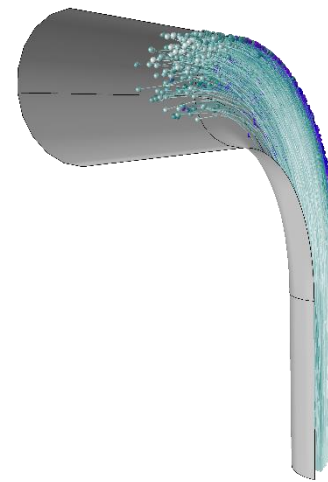
粒子追踪



数学粒子追踪



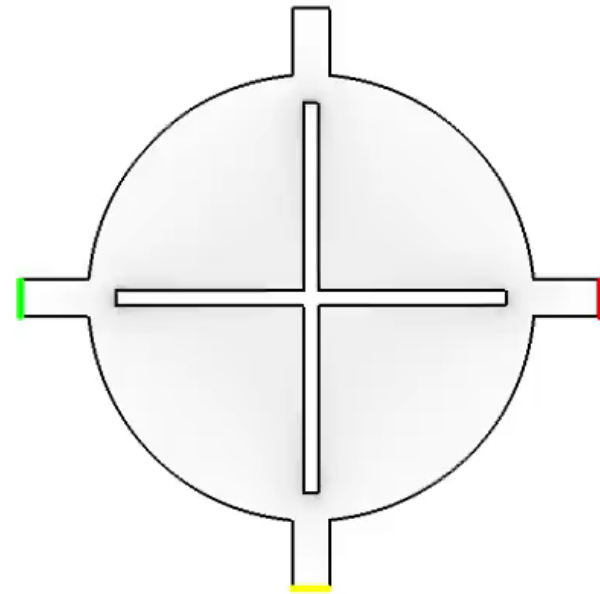
带电粒子追踪



流场中的粒子追踪

粒子追踪模型的设置

- 计算必要的物理场，例如：
 - 流体速度场用于计算阻力
 - 温度场用于计算热泳力
 - 电场和磁场
- 定义多种颗粒属性
- 定义颗粒释放方式
- 设置边界条件和受力
- 使用瞬态求解器计算粒子轨迹



微型混合器中的粒子轨迹

运动方程

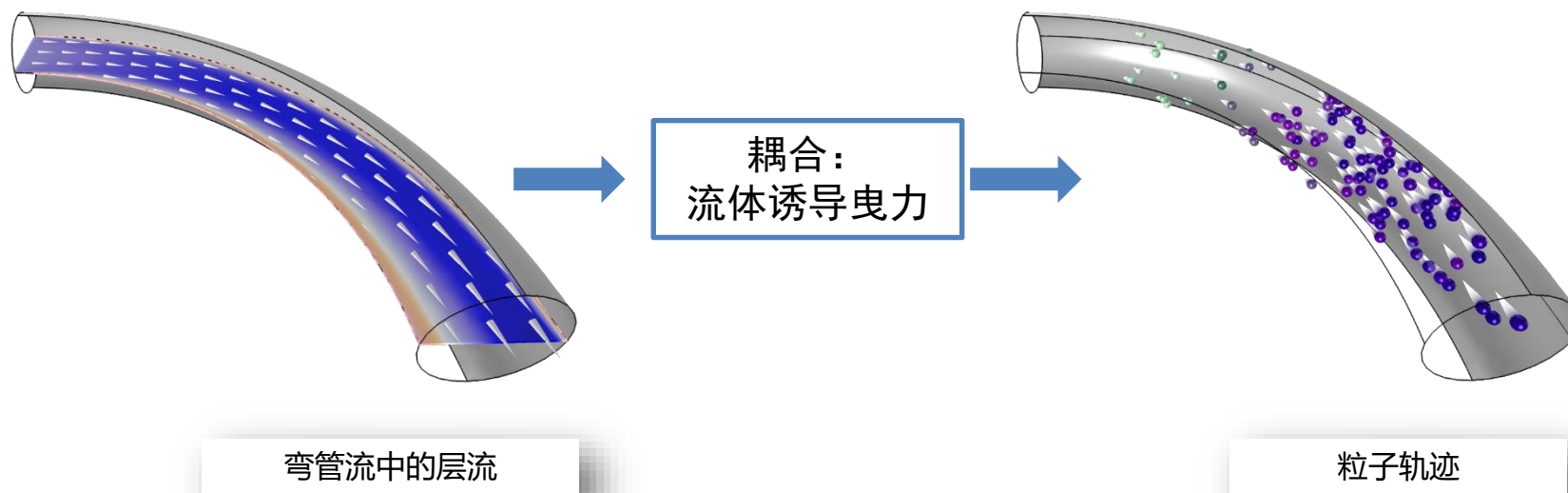
$$\frac{d\mathbf{q}}{dt} = \mathbf{v}$$

$$\frac{d}{dt}(m_p \mathbf{v}) = \sum \mathbf{F}$$

- \mathbf{q} 表示粒子位置
- \mathbf{v} 表示粒子速度
- m_p 表示粒子质量
- $\sum \mathbf{F}$ 表示总受力

曳力

- 大多数情况是单向耦合
- 应用于稀疏的颗粒流：颗粒密度低



曳力

- 曳力 \mathbf{F}_D 与粒子的尺寸、质量和速度以及流体粘性、速度相关：

$$\mathbf{F}_D = \frac{1}{\tau_p} m_p (\mathbf{u} - \mathbf{v}) \quad \tau_p = \frac{4\rho_p d_p^2}{3\mu C_D \text{Re}_r}$$

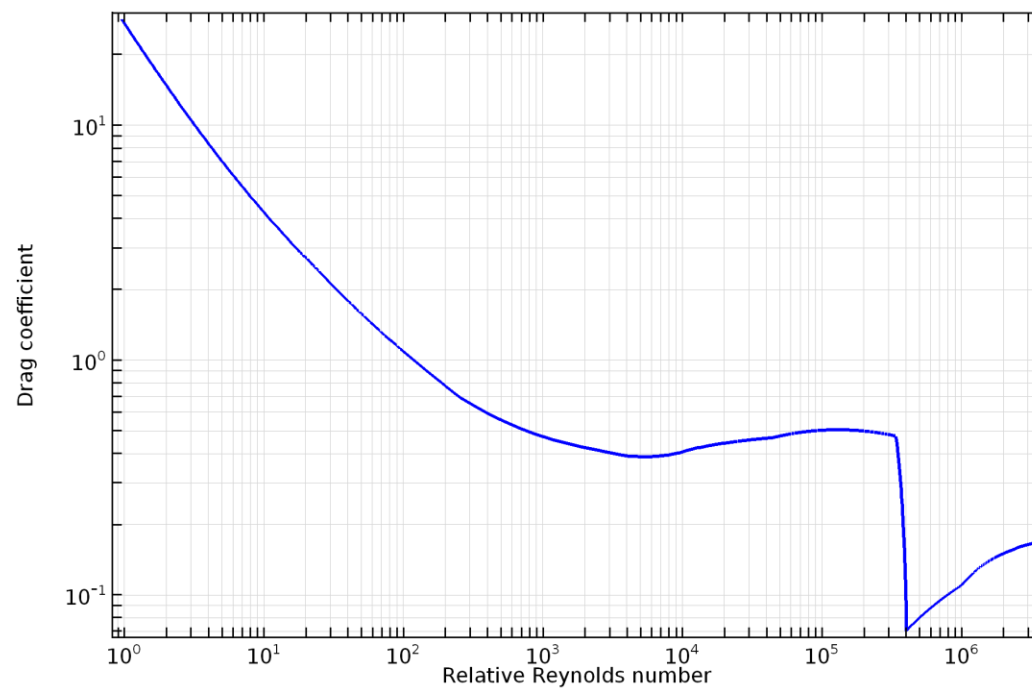
- 颗粒速度响应时间 τ_p 表示颗粒被加速到流体速度的快慢
- 其中，相对雷诺数

$$\text{Re}_r = \frac{|\mathbf{u} - \mathbf{v}| d_p}{\nu}$$

曳力定律举例

曳力定律	表达式	适用条件
Stokes	$C_D = \frac{24}{Re_r}$	$Re_r \ll 1$
Schiller-Naumann	$C_D = \frac{24}{Re_r} (1 + 0.15 Re_r^{0.687})$	$Re_r < 800$
Hadamard-Rybczynski	$C_D = \frac{8}{Re_r} \frac{2 + 3\mu_p/\mu}{1 + \mu_p/\mu}$	纯液滴或气泡
标准曳力定律	变化曲线	支持相对雷诺数的范围大

标准曳力关系



湍流中的粒子追踪

- 基于 RANS 的湍流模型仅给出流场的平均流速，而没有流速的随机脉动项

$$\mathbf{F}_D = \frac{1}{\tau_p} m_p (\mathbf{u}' - \mathbf{v})$$
$$\mathbf{u}' = \mathbf{u} + \Delta \mathbf{u}$$

- \mathbf{u} 表示平均速度（通过 RANS 计算得到）
- $\Delta \mathbf{u}$ 表示湍流的随机脉动（通过模型计算）
- 支持的湍流模型：
 - k- ε 模型，k- ω 模型，SST 模型，低雷诺数 k- ε 模型

曳力

曳力定律:

标准曳力相关

速度:

\mathbf{u} 速度场 (spf)

动力粘度:

μ 来自材料

密度:

ρ 来自材料

湍流弥散

湍流弥散模型:

离散随机游走

无

离散随机游走

连续随机游走

湍流耗散率:

ε 湍流耗散率 (spf)

拉格朗日时间尺度系数:

C_L 0.2 1

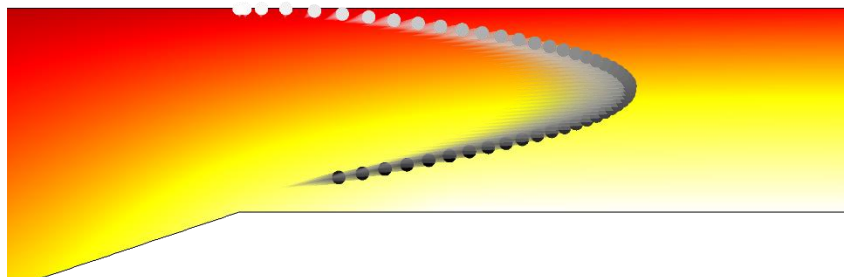
高级设置

受影响的粒子:

全部

其它预置力

- 升力
- 热泳力
- 电场力
- 磁场力
- 磁力
- 颗粒间相互作用
 - 库仑力
 - Lennard-Jones作用力
 - 线弹性力
- 用户定义表达式

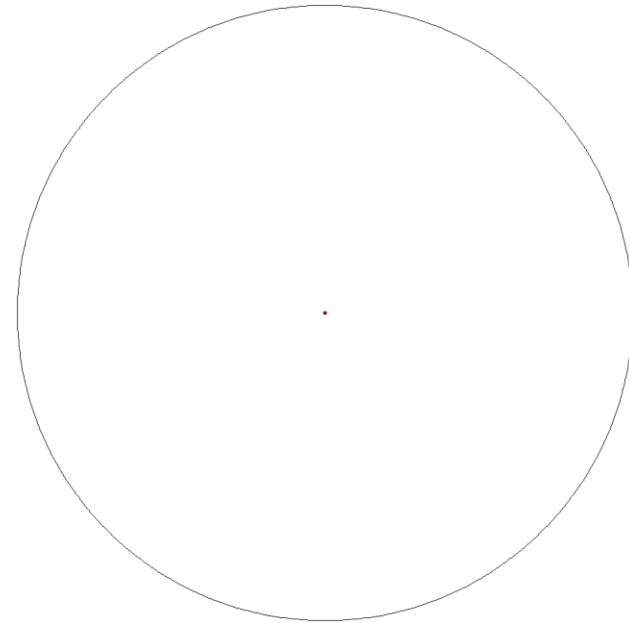


加热感应器中的热泳粒子

颗粒的对流和扩散

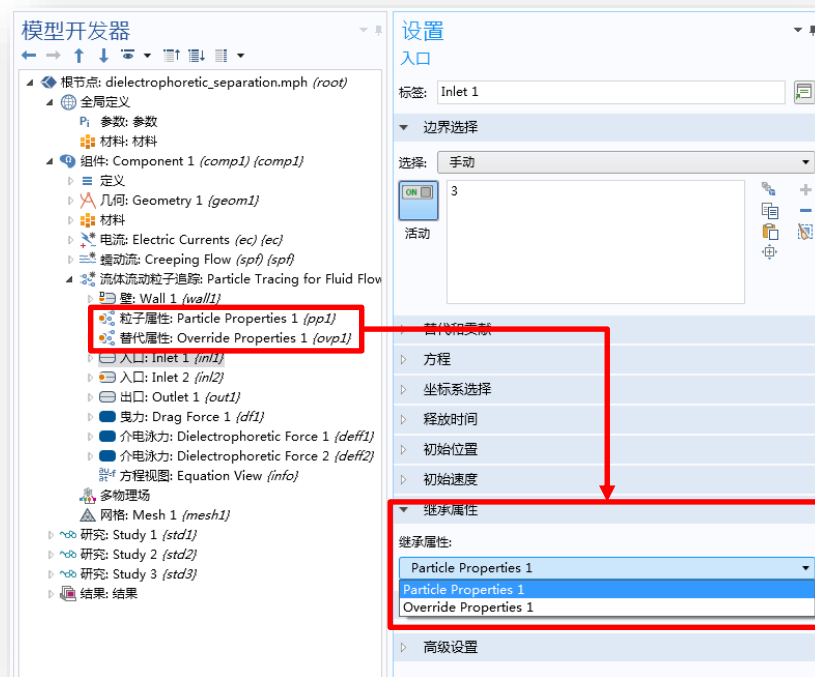
- 对流可以归结为阻力
- 非常小的粒子收到分子扩散的影响
- 预制的布朗力可以建立颗粒扩散的随机模型

- $$\mathbf{F}_b = \zeta \sqrt{\frac{12\pi k_B \mu T r_p}{\Delta t}}$$

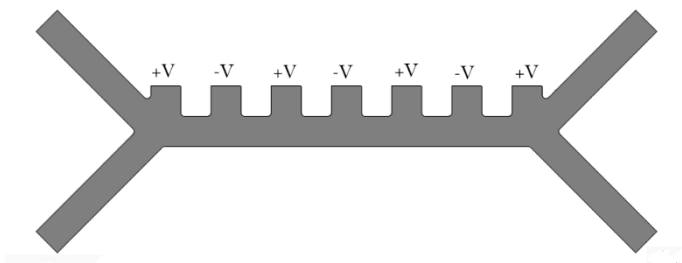


多种粒子追踪

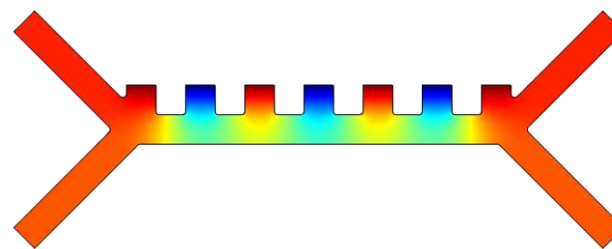
- 在一个模型中定义多个系列的粒子属性
- 当释放粒子时，可以选择特定的粒子属性
- 也可以针对特定的粒子设置受力情况



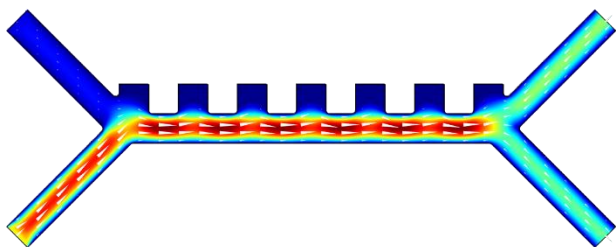
血液细胞的介电泳分离



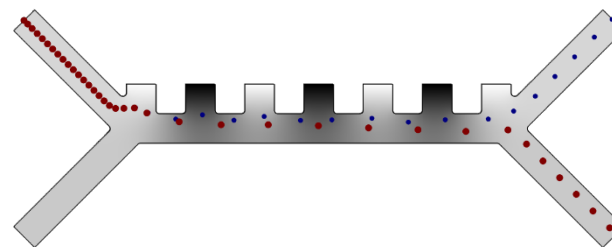
使用的电势



电势分布

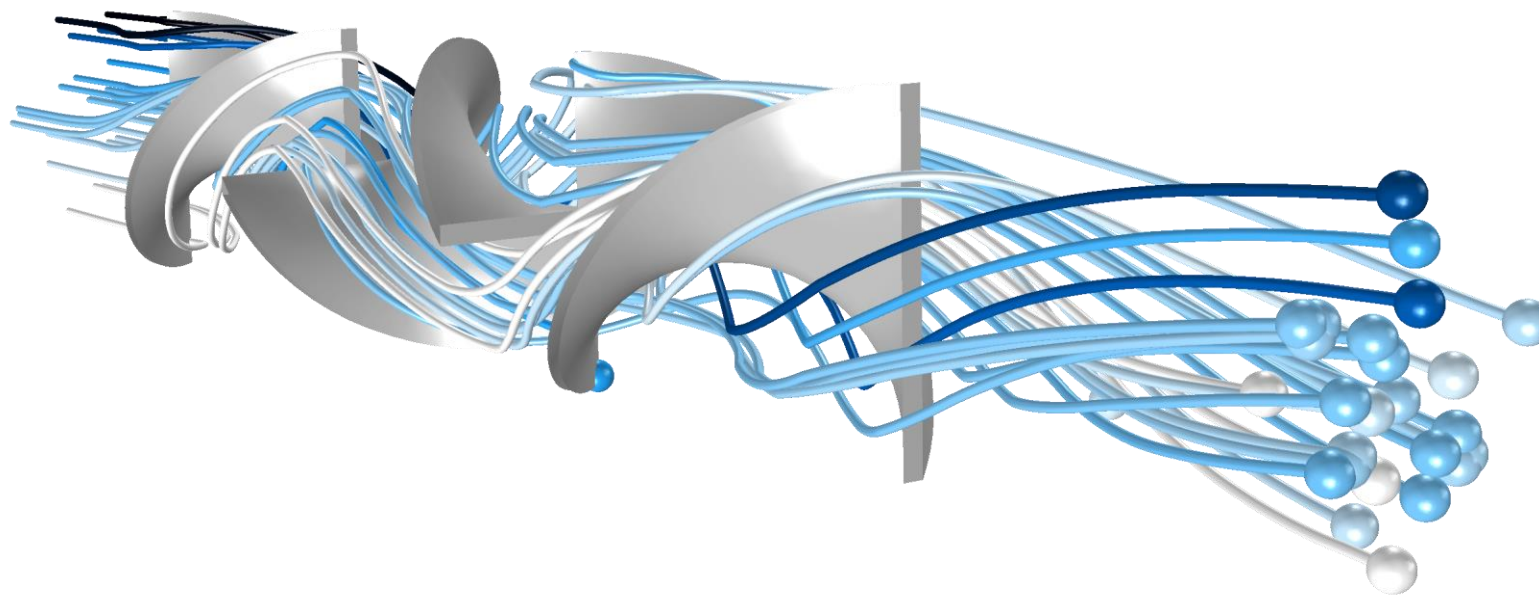


流场



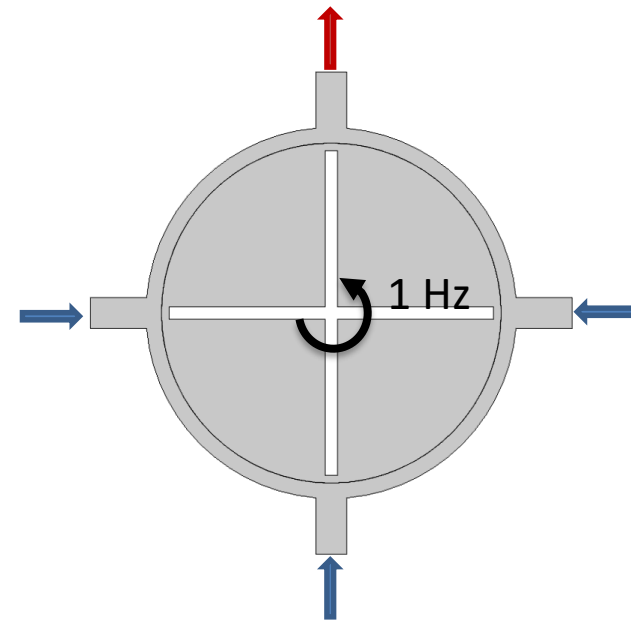
血小板（蓝色）与红细胞（红色）
的轨迹

层流静态混合器的仿真

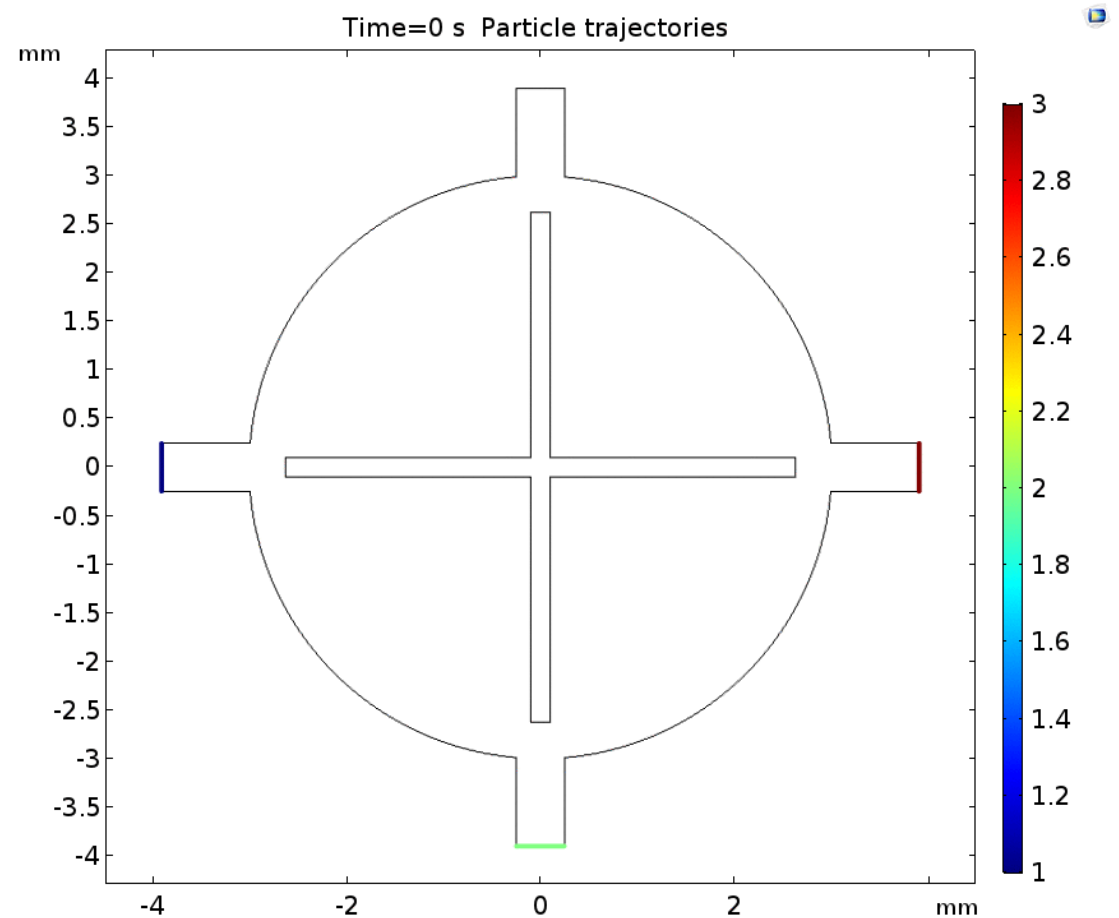
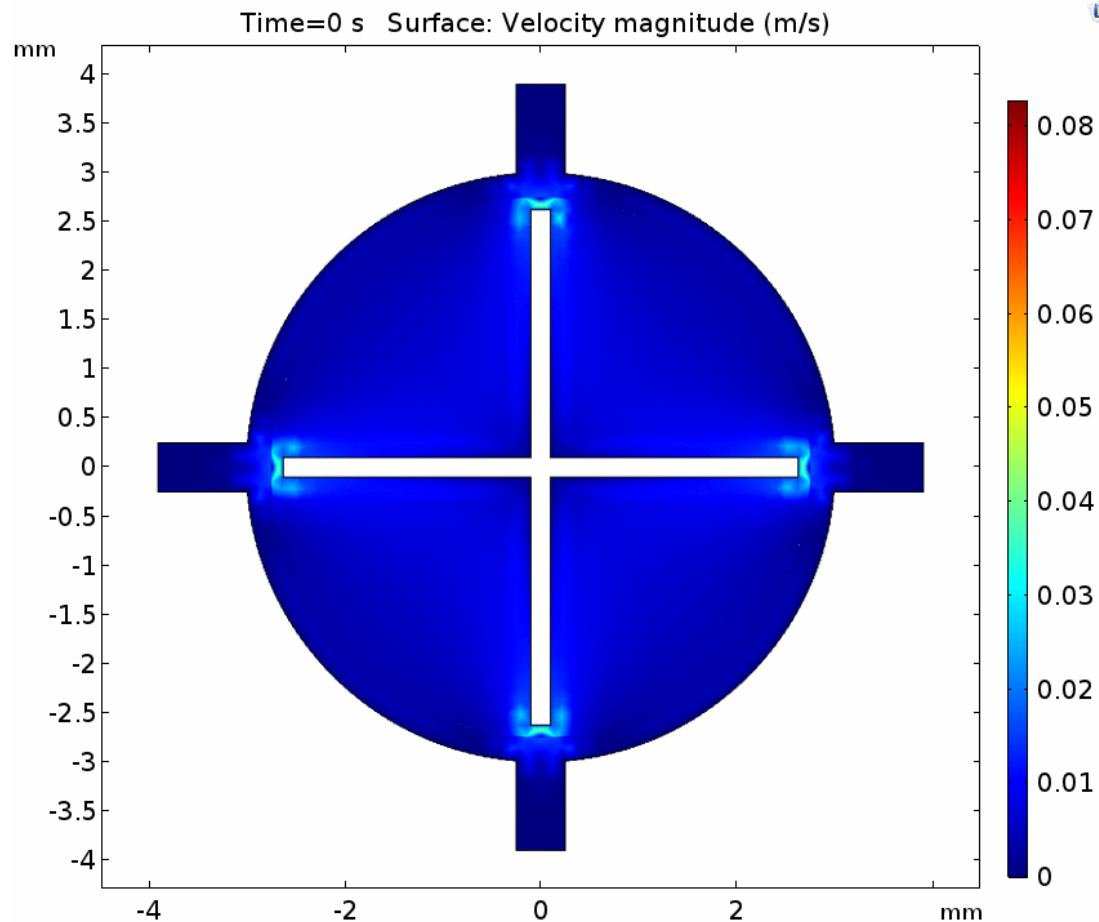


演示：微型搅拌器中的粒子追踪

- 目标
 - 考察旋转搅拌器内不同时刻的粒子混合
- 物理场
 - 旋转机械，2D
 - 层流
 - 粒子追踪



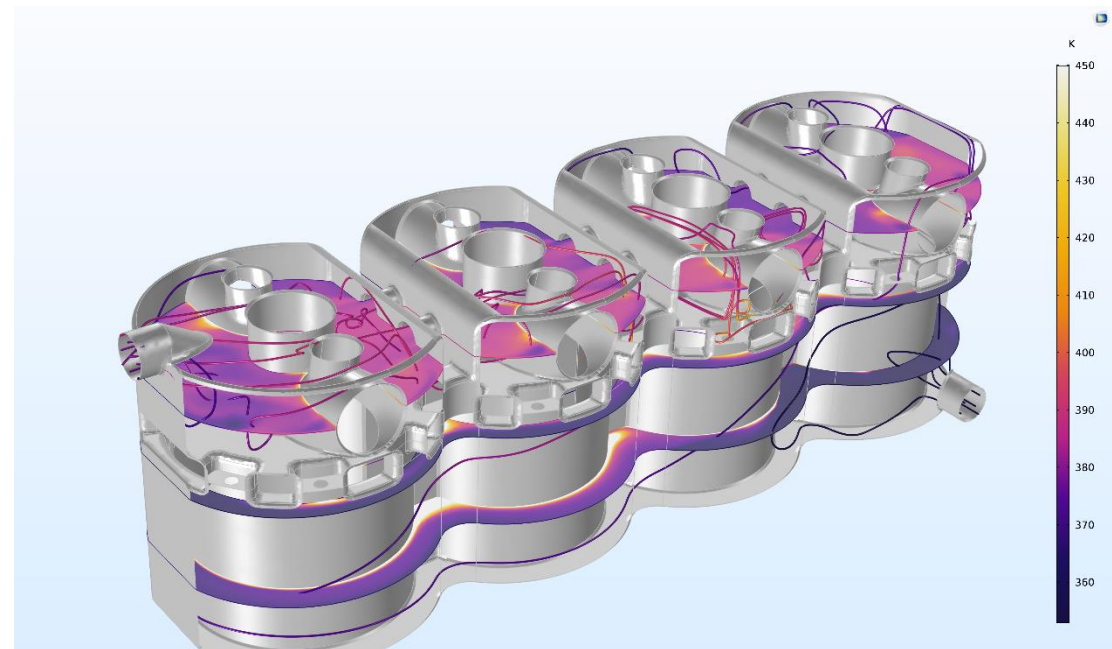
演示：微型搅拌器中的粒子追踪



非等温流与高马赫数流

非等温流和共轭传热

- 流体和固体传热
- 层流或湍流
- 浮力诱导湍流
- 可压缩、弱可压缩或Boussinesq近似
- 对流换热的工程校正
- 多孔介质传热
- 当使用 k - ε 模型、Reliable k - ε 模型和 k - ω 湍流模型时的热壁函数
- 湍流 Prandtl 数
 - Kays-Crawford模型和扩展 Kays-Crawford模型



引擎模块冷却中的共轭传热

非等温流

- 具有对流项的传热方程(能量守恒)

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p \mathbf{u} \cdot \nabla T + \nabla \cdot (-k \nabla T) = Q$$

- Navier-Stokes方程 (动量守恒)

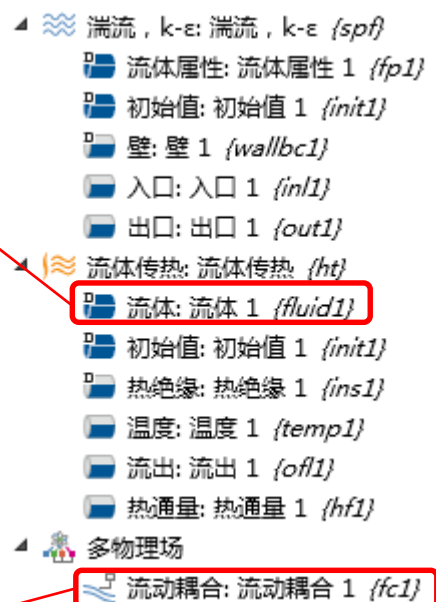
$$\rho \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \rho (\mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u}) = -\nabla p + \mu \Delta \mathbf{u} + \mathbf{F}$$

- 连续性方程 (质量守恒)

$$\nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0$$

2 耦合
5 因变量(T, u, v, w, p)
温度依赖材料属性

单向耦合



Navier Stokes 方程:

$$\rho(T)(\mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u}) = -\nabla p + \mu(T)\Delta \mathbf{u} + \mathbf{F}$$

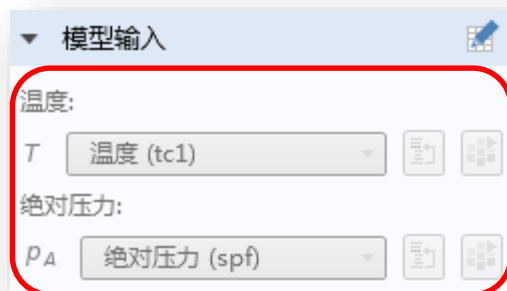
压力场用于密度计算

传热方程

$$\rho C_p \mathbf{u} \cdot \nabla T + \nabla \cdot (-k \nabla T) = Q$$

速度场用于对流项计算

双向耦合



- 湍流, k-ε: 湍流, k-ε {spf}
- 流体属性: 流体属性 1 {fp1}
- 初始值: 初始值 1 {init1}
- 壁: 壁 1 {wallbc1}
- 入口: 入口 1 {in1}
- 出口: 出口 1 {out1}
- 流体传热: 流体传热 {ht}
- 流体: 流体 1 {fluid1}
- 初始值: 初始值 1 {init1}
- 热绝缘: 热绝缘 1 {ins1}
- 温度: 温度 1 {temp1}
- 流出: 流出 1 {off1}
- 热通量: 热通量 1 {hf1}
- 多物理场
- 流动耦合: 流动耦合 1 {fc1}
- 温度耦合: 温度耦合 1 {tc1}

Navier Stokes 方程:

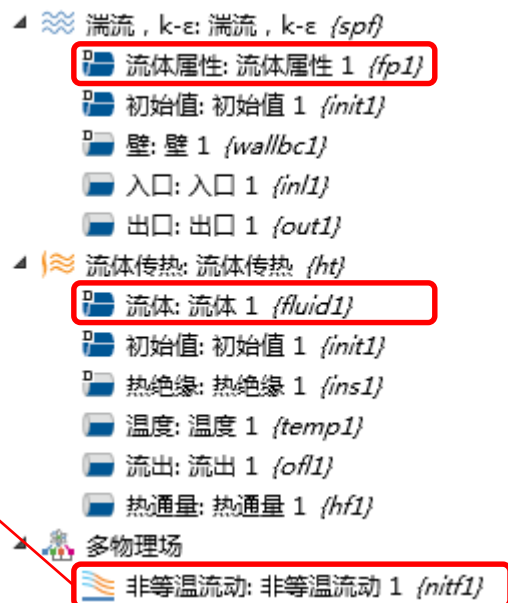
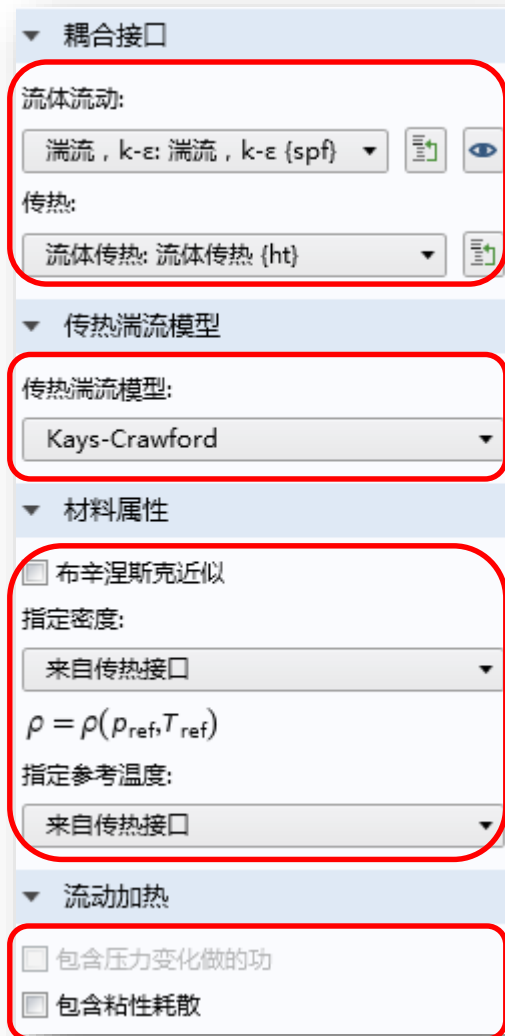
$$\rho(T)(\mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u}) = -\nabla p + \mu(T)\Delta \mathbf{u} + \mathbf{F}$$

流体方程中的材料属性与温度有关

传热方程

$$\rho C_p \mathbf{u} \cdot \nabla T + \nabla \cdot (-k \nabla T) = Q$$

双向耦合-非等温流



Navier Stokes 方程:

$$\rho(T)(\mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u}) = -\nabla p + \mu(T)\Delta \mathbf{u} + \mathbf{F}$$

流体方程中的材料属性与温度有关

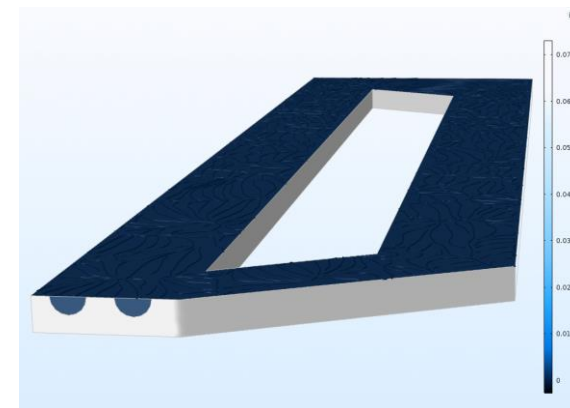
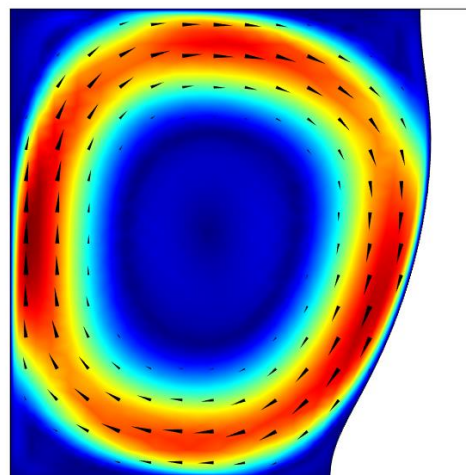
传热方程

$$\rho C_p \mathbf{u} \cdot \nabla T + \nabla \cdot (-k \nabla T) = Q$$

速度场用于对流项计算

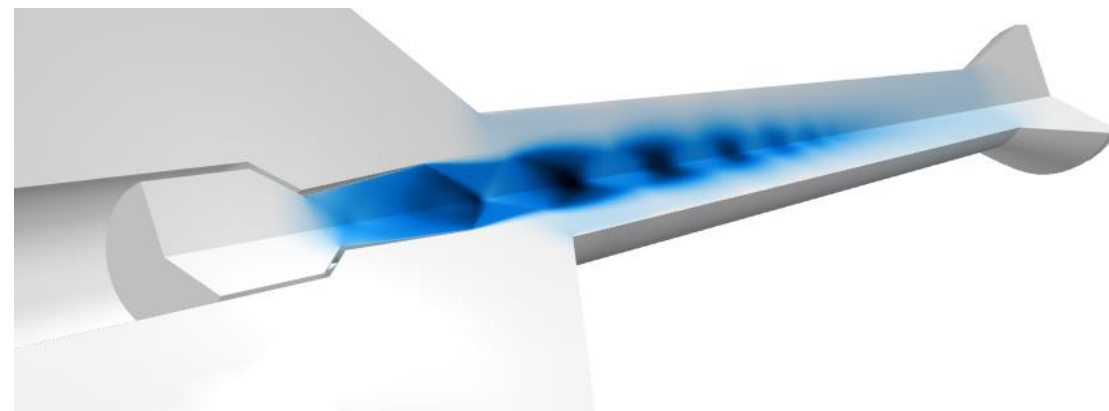
相变类型及建模思路

- 考虑界面
 - 分离型两相流：水平集、相场法
 - 应用：气液相变
 - 单相流：移动网格
 - 应用：液固相变、气固相变
 - 相变材料（模糊界面）
 - 应用：液固相变、气液相变（慎用）
- 不考虑相界面
 - 分散型两相流：气泡流、混合物模型和双欧拉
 - 应用：气液相变、液固相变和气固相变（反应）

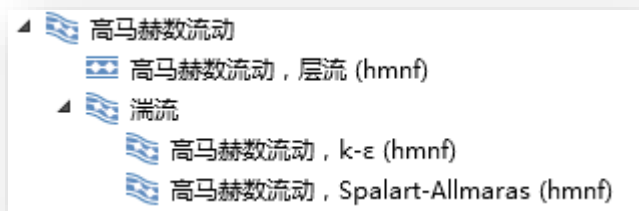


高马赫数流

- 层流或湍流
- $k-\varepsilon$ 湍流模型
- Spalart-Allmaras 模型
- 使用完整的可压缩流动方程
- Sutherland 定律描述粘度和热导率大小

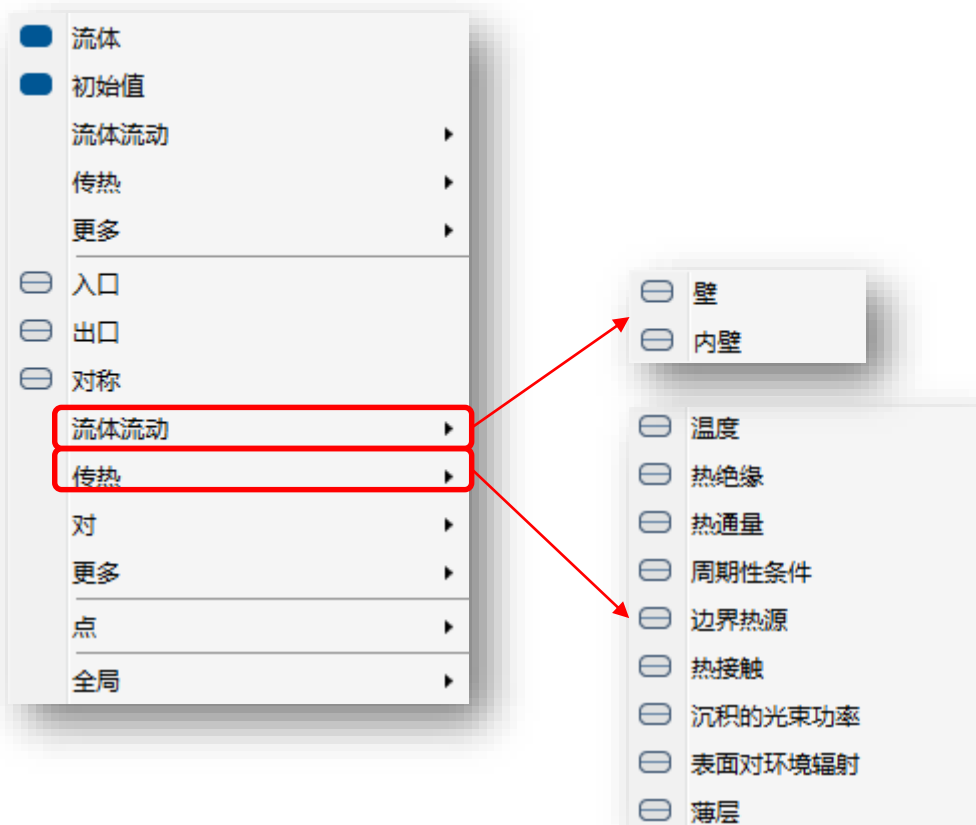


超音速射流中湍流流场的激波串



高马赫数流

- 边界条件



- 域条件



流入流出条件

- 在可压缩性流动中使用压力-压力组合定义进出口边界

- 条件中设置的压力是绝对压力
- 总压和总温是一个能量的概念

$$\frac{p_{\text{tot}}}{p_{\text{stat}}} = \left(1 + \frac{\gamma-1}{2} Ma^2\right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}$$
$$\frac{T_{\text{tot}}}{T_{\text{stat}}} = \left(1 + \frac{\gamma-1}{2} Ma^2\right)$$

- 需要通过马赫数确定静压和静温
- 出口处需要指定压力



流动条件: 超音速

流动属性

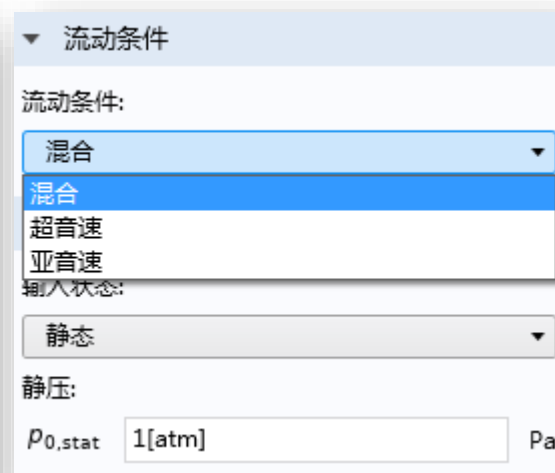
输入状态: 总

总压: $p_{0,\text{tot}}$ pin_tot Pa

总温度: $T_{0,\text{tot}}$ Tin_tot K

马赫数: Ma_0 M1 1

流动方向: 法向流入



流动条件: 混合

混合

超音速

亚音速

输入状态: 静态

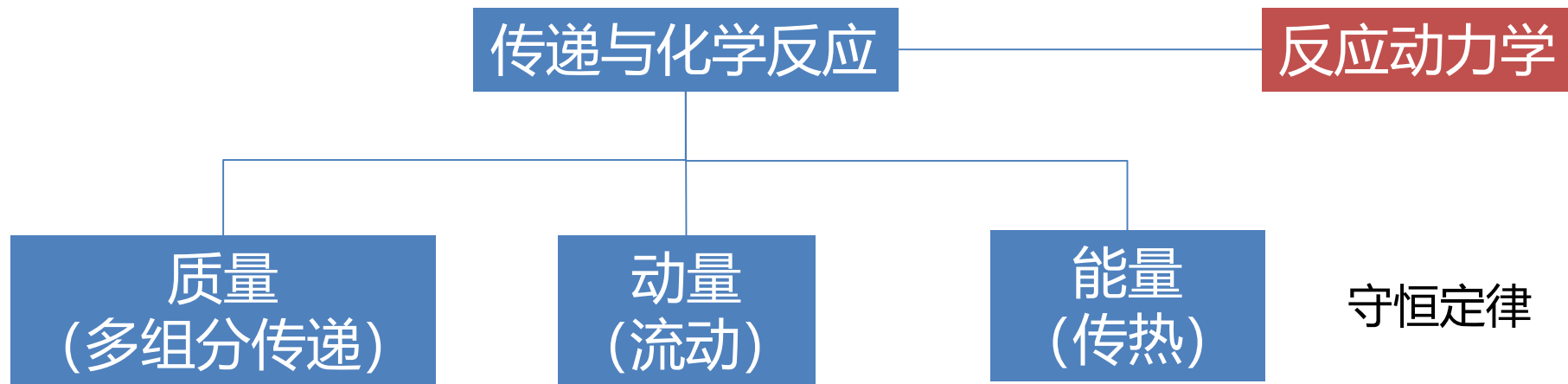
静压: $p_{0,\text{stat}}$ 1[atm] Pa

高马赫数 vs. 非等温流

- 对于理想气体，两个接口求解的方程，但
- 高马赫数流
 - 独特的进出口边界特征
 - 适用于跨音速和超音速的一致稳定性方法
- 非等温流
 - 更多的湍流模型
 - 可以使用更通用的材料模型（布辛涅斯克）

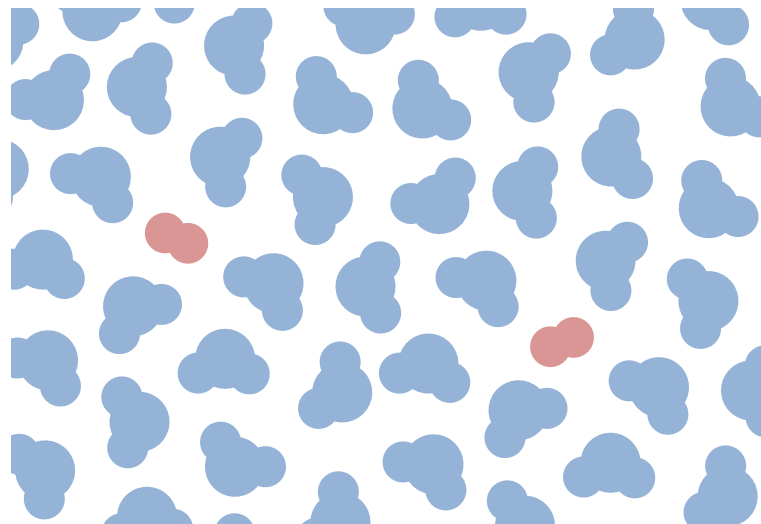
反应流

质量、动量、能量、化学反应



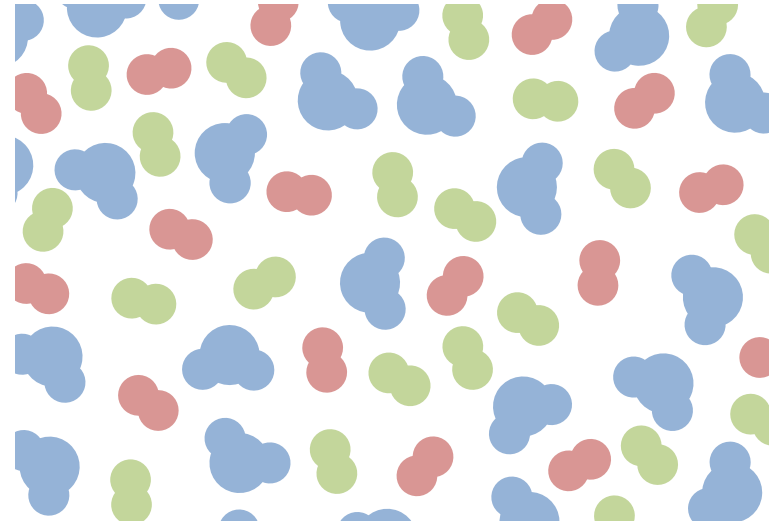
稀物质传递

- 溶质仅与溶剂存在相互作用
- 溶剂密度等于溶液密度
- 反应工程模块
 - Fick 定律
 - 努森扩散和含尘气体



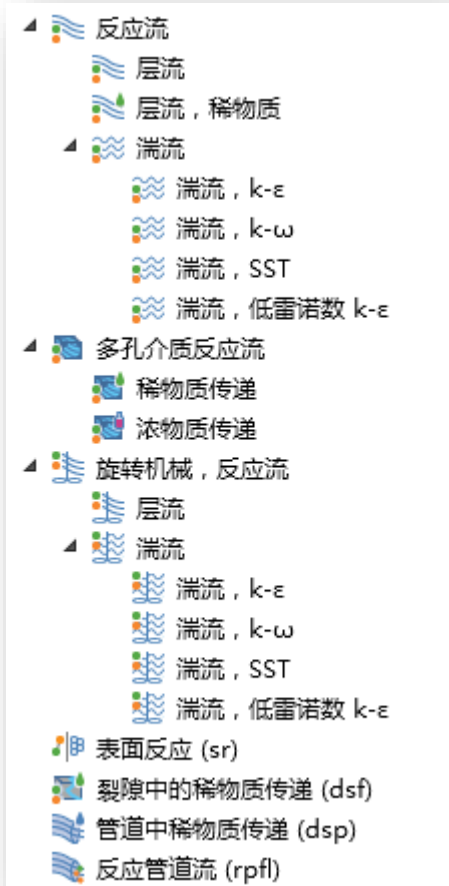
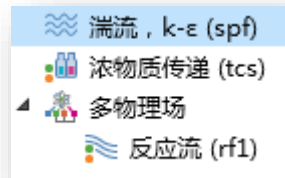
浓物质传递

- 所有组分间存在相互作用
- 溶液密度等于所有组分的加和
- 反应工程模块
 - Maxwell-Stefan 定律
 - 混合物平均
 - 努森扩散和含尘气体

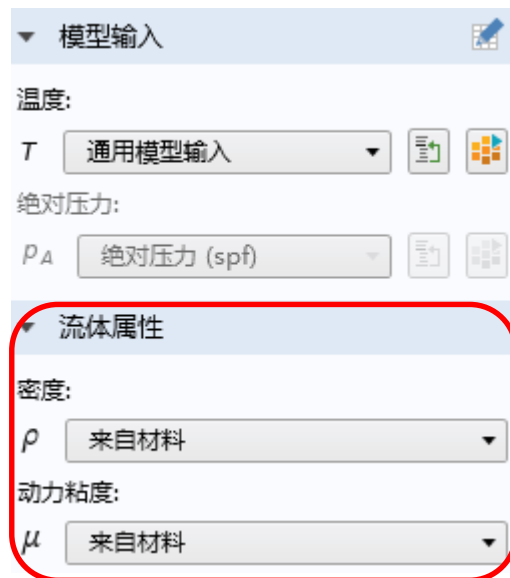


物理场接口

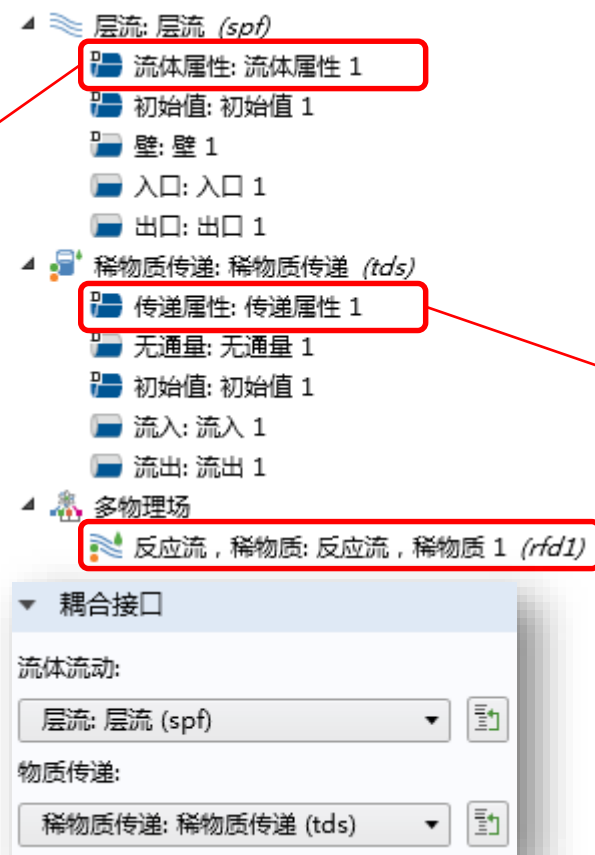
- 兼容的流场类型：
 - 层流
 - 湍流
 - 多孔介质流
 - 旋转机械
 - 裂隙流
 - 管道流
- 包含流场接口和物质传递接口
- 包含“反应流”多物理场节点



稀物质传递反应流



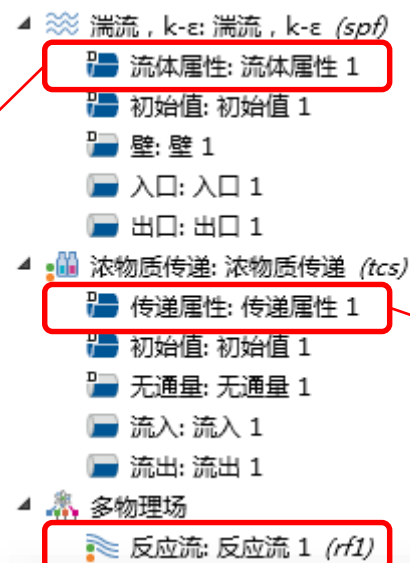
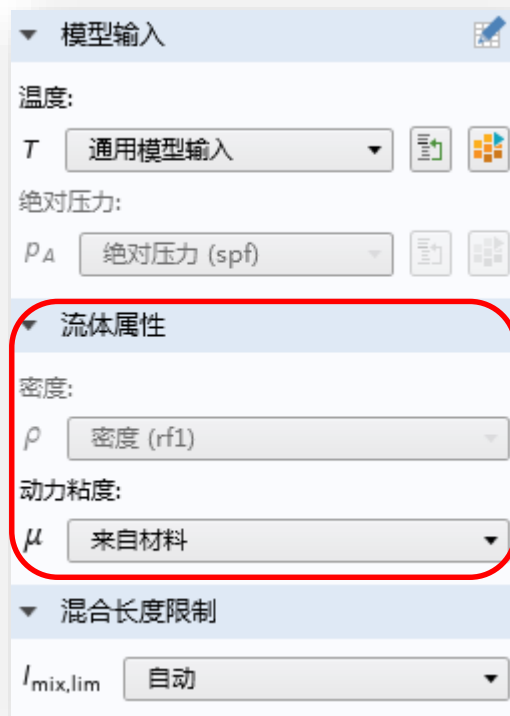
流体属不受物
质组成的影响



对流项速度

浓物质传递反应流

流体属性受物质组成的影响



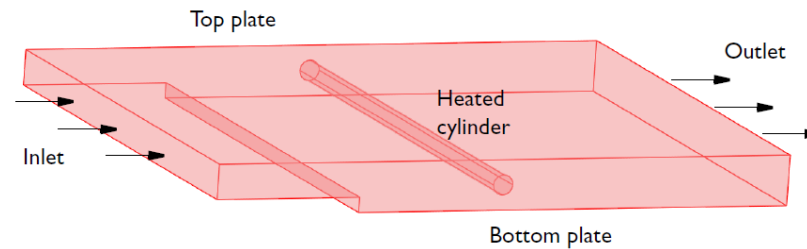
对流项速度

$$D_{effective} = (D + D_T) \quad D_T = \frac{\mu_T}{\rho S c_T}$$

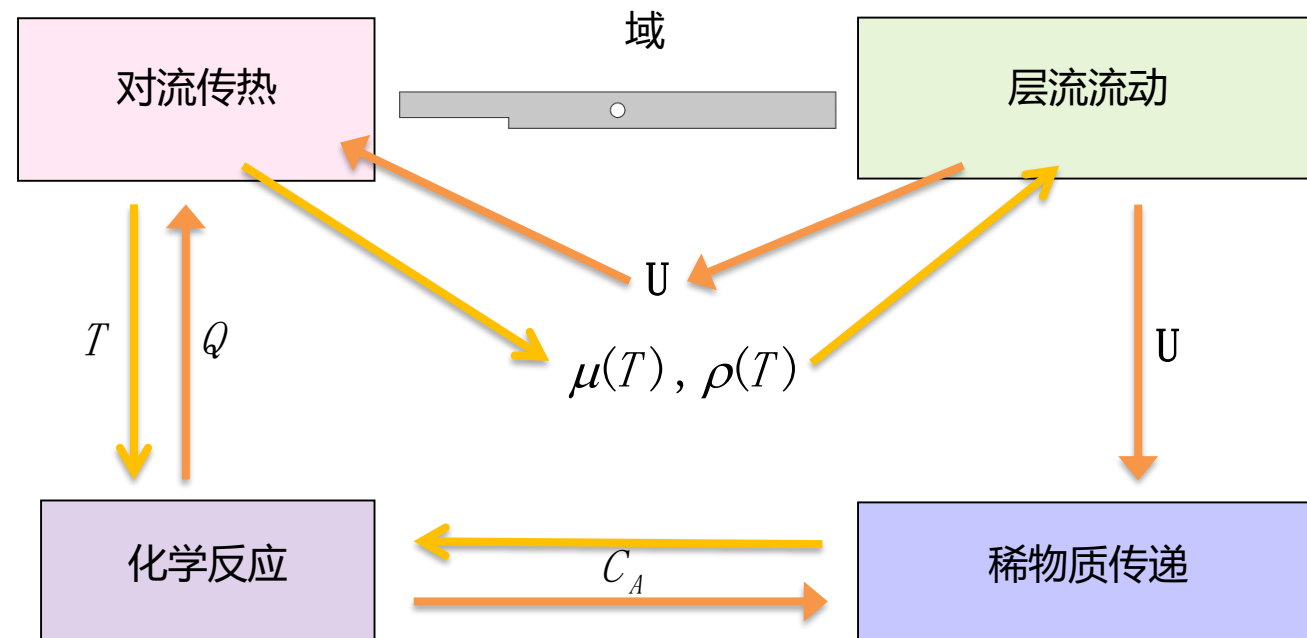


演示：热分解反应器

- 多物理场：层流 + 热 + 化学 + 稀物质传递
 - 流动影响传热和传质
 - 传热和传质影响化学反应速率
 - 化学反应热影响传热
- 目的：分析流速、温度和组分浓度分布

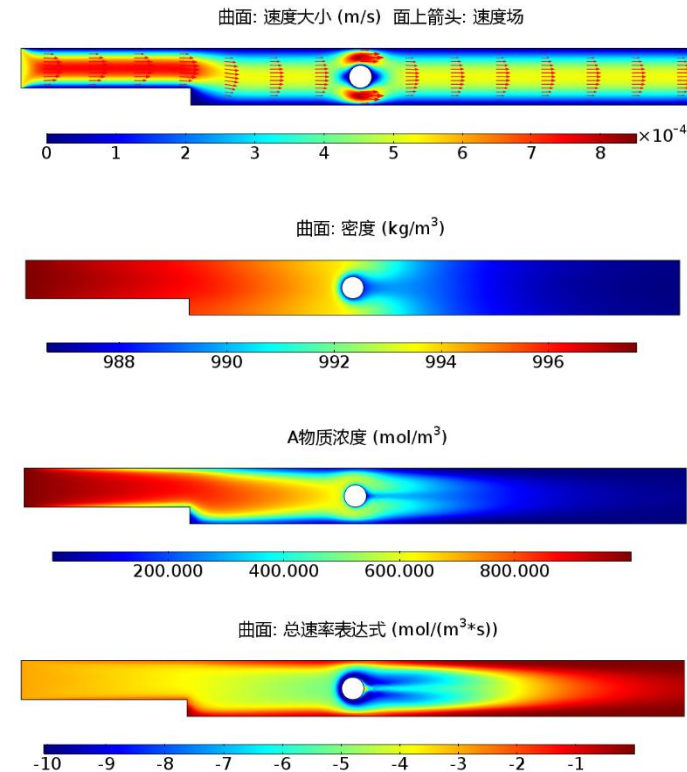


耦合四个物理场



结果：热分解反应器

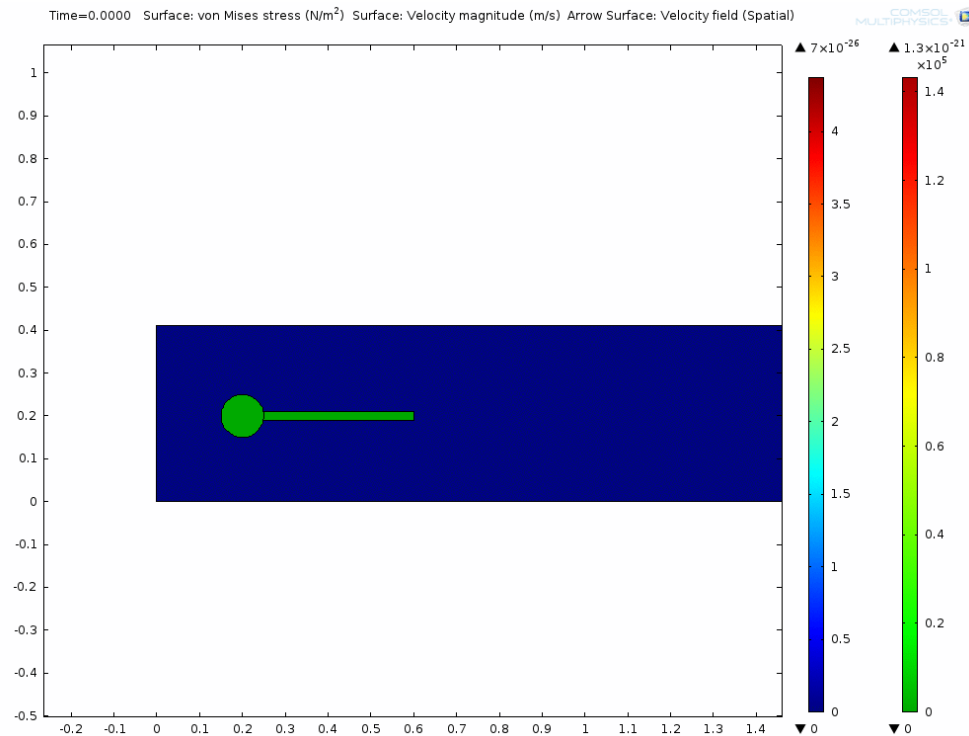
- 计算得到速度分布
- 流动与传热耦合之后的密度分布
- 四个物理场的强耦合模型
- 计算得到浓度和反应速率分布



流固耦合

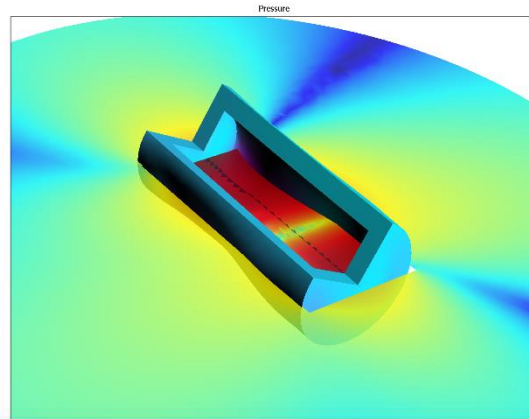
什么是流固耦合(FSI)?

- 流体流动/压力对结构变形的影响以及/或相反的过程

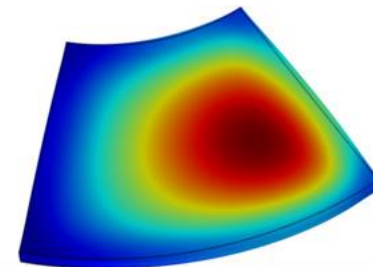


FSI的不同类型

- 流体流动以及固体变形
 - 大的刚性位移
 - 小的弹性变形
 - 大的弹性变形
- 声-固耦合
 - 固体
 - 壳
 - 膜
- 多孔弹性
- 在润滑应用中的流固耦合
- 两相流中的流固耦合



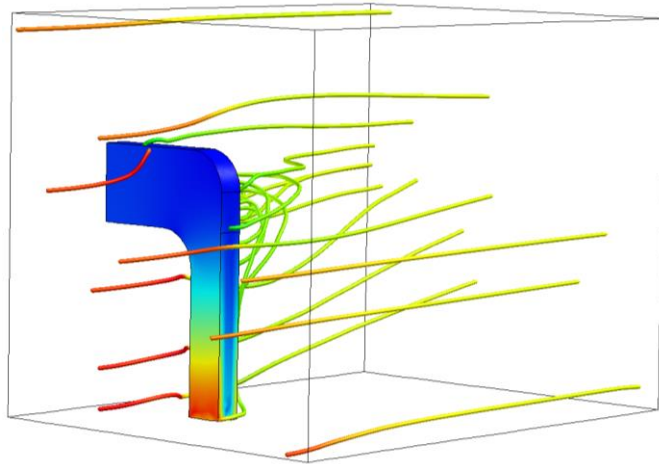
声-固耦合出现在很多应用中，包括声呐。该图显示了此类应用声波的声压分布图。



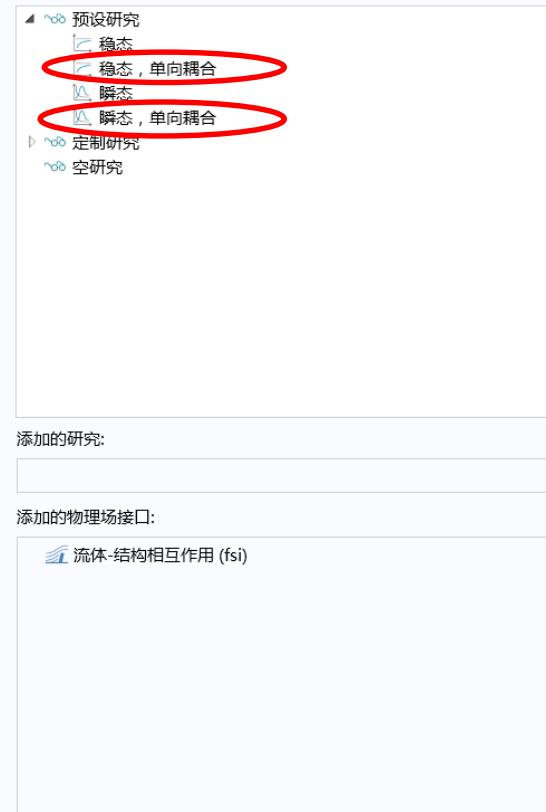
机油中的压力分布

FSI: 单向多物理场耦合

- 弹性结构的小变形
 - 取决于流体作用力的应力分析
 - 自动多物理场耦合
 - 单向多物理场耦合

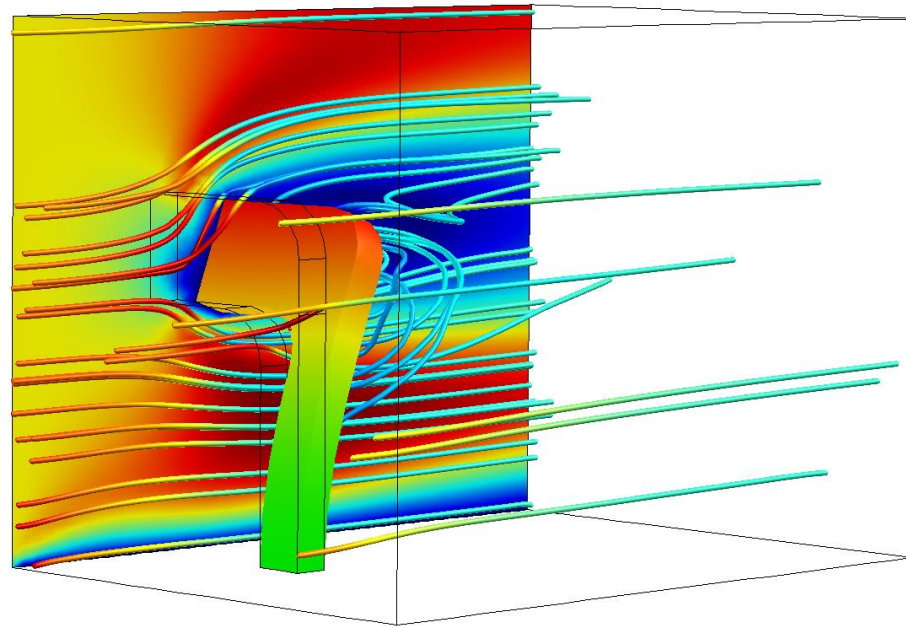


选择研究



FSI: 双向多物理场耦合

- 弹性结构的大变形
 - 使用移动网格描述流体域的几何变化
 - 流固耦合物理场接口

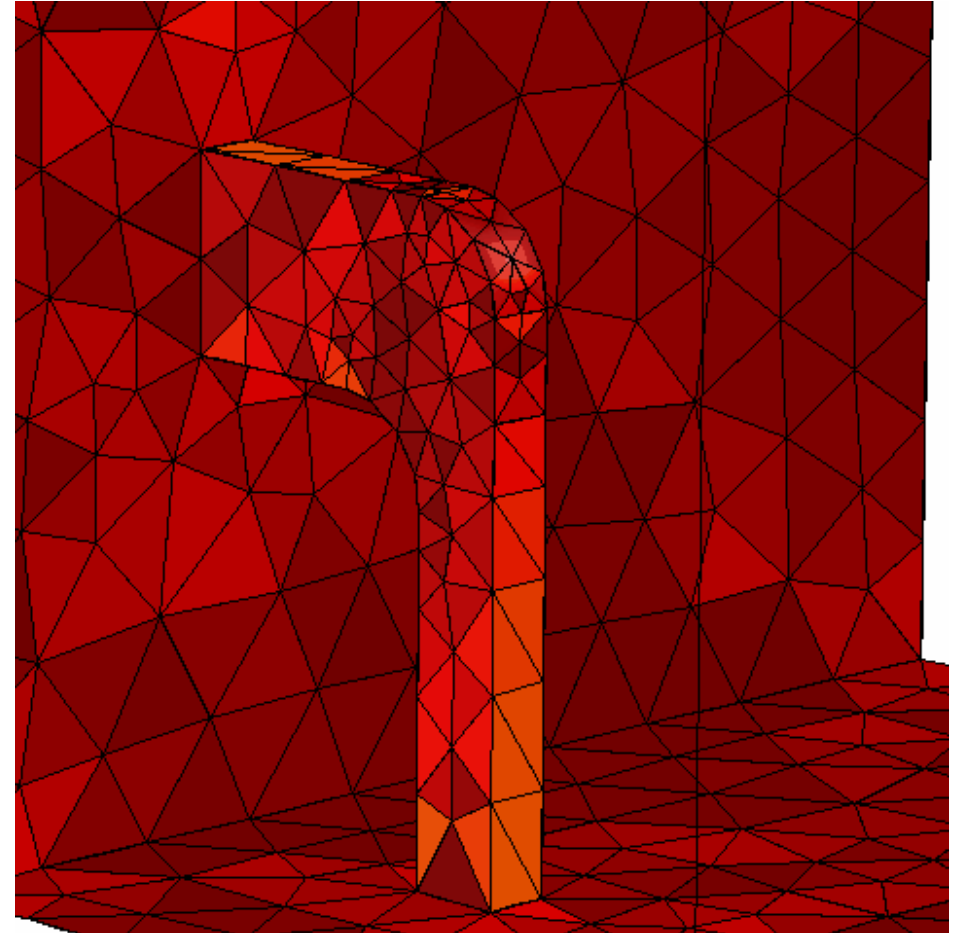


流固耦合接口

- 在流体和固体的界面上：
 - 固体受到的外部载荷来自于流体上的作用力
 - 移动壁条件利用固体的速度场定义
 - 网格的位移根据固体的位移定义
- COMSOL Multiphysics® 自动计算作用于壁面上的流体作用力
 - 预置的计算总力的表达式
- 流固耦合物理场接口包含了三个物理场接口：
 - 结构力学
 - 流体流动
 - 移动网格

空间框架

- 通过额外的PDE计算网格（ Virtual mesh ）
- 变形的网格跟随结构变形
- 流体域中的网格变形设置为自由，并指定固体中的结构位移



流固耦合接口

- 流体流动的本构方程:

- 层流
- 湍流 (k - ϵ , k - ω , low Re k - ϵ , Spallart-Almaras, SST)
- 可压缩 ($Ma < 0.3$)
- 多相流, 需要手动设置耦合

- 固体本构方程

- 线弹性
- 超弹性
- 粘弹性
- 弹塑性
- 热应力
- 蠕变
- 其他: 岩石, 混凝土等

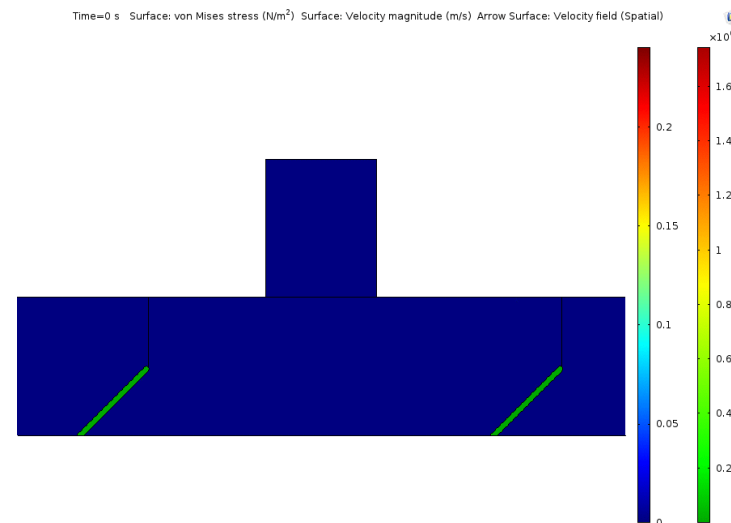
流-固耦合物理场接口

- 定义流体和固体接口
- 流固界面会自动检测
- 设置物理属性(流体和固体), 通常不需要移动网格边界条件



建模技巧

- 使用带平滑的阶跃函数来开始瞬态分析
 - 避免初始速度立刻达到设定值从而造成与初始值不一致
- 若缺省的分离求解器不收敛，使用全耦合求解器
- 若能解决问题，尽量用单向耦合，减少内存消耗
- 对于网格过度变形：
 - 沿网格整体移动方向指定边界单元移动，减少过度变形
 - 也可以通过添加内部边界达到该效果
 - 使用自动重新剖分网格
 - 该功能计算量比以上方式更大也更细致

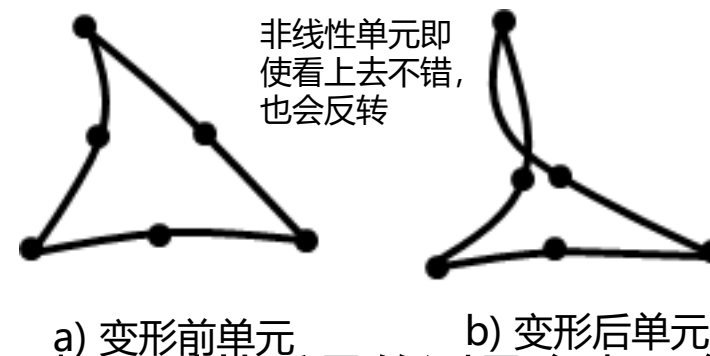


根据网格质量重新剖分网格

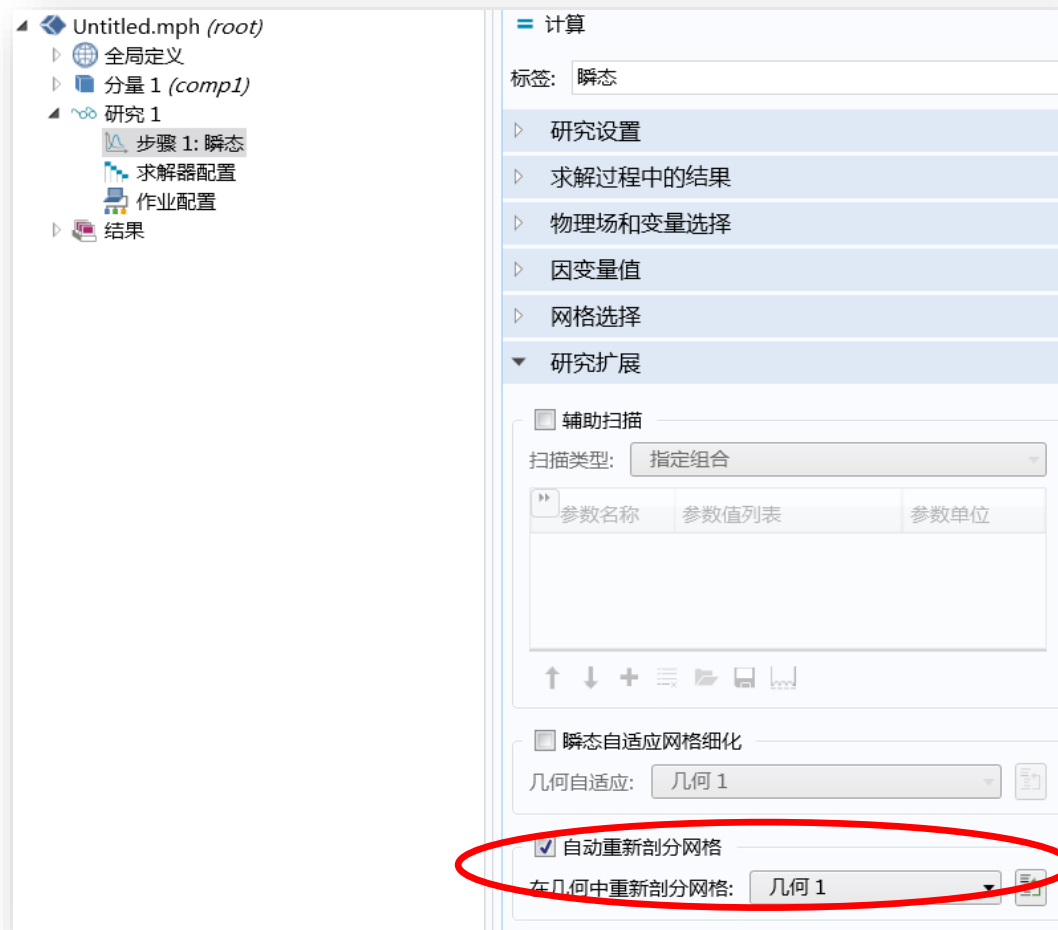
- `comp1.spatial.minqual`(最差单元质量)
 - 此变量的值应该被设置在0-1之间
 - 对于各向异性网格单元是一个很好的指示器，或者换句话说就是控制网格单元的纵横比。基于这个功能，测量尖端处非常小的固体角处的单元会得到更小的单元质量值
 - 使用这个检测，依赖于此类单元对计算模型的伤害程度，这种单元可能是某些数值模型所需的，但是对其他的一些模型而言，却是非常不利的
 - 填充域的四面体单元的数量反比于域的体积，内插的单元精度反比于其最长边的长度

网格质量的测量

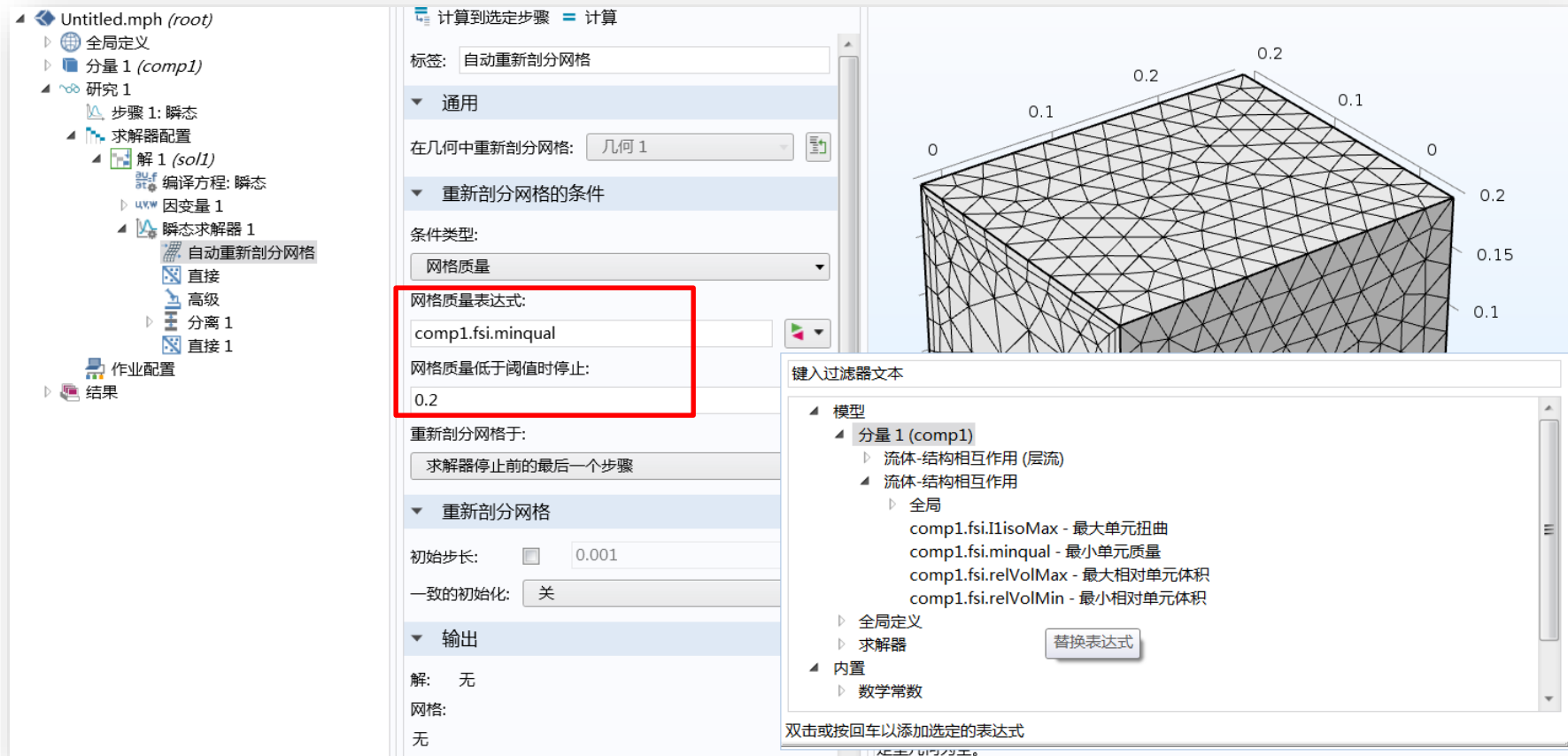
- `comp1.spatial.relVolMin`(最小相对单元体积)
 - 相对单元体积是在空间和材料框架中测量得到的部分(无穷小)网格单元体积的比值
 - 测量局部单元的体积扭曲
 - 该变量应该被设置为正数
 - 该测量有助于避免反转网格
 - 不希望得到的网格变形如下
 - 示例b)出现的是我们不希望的网格 – 反转网格，对其质量的测量会出现负值
 - 具有共面顶点的三维单元可能会产生零体积



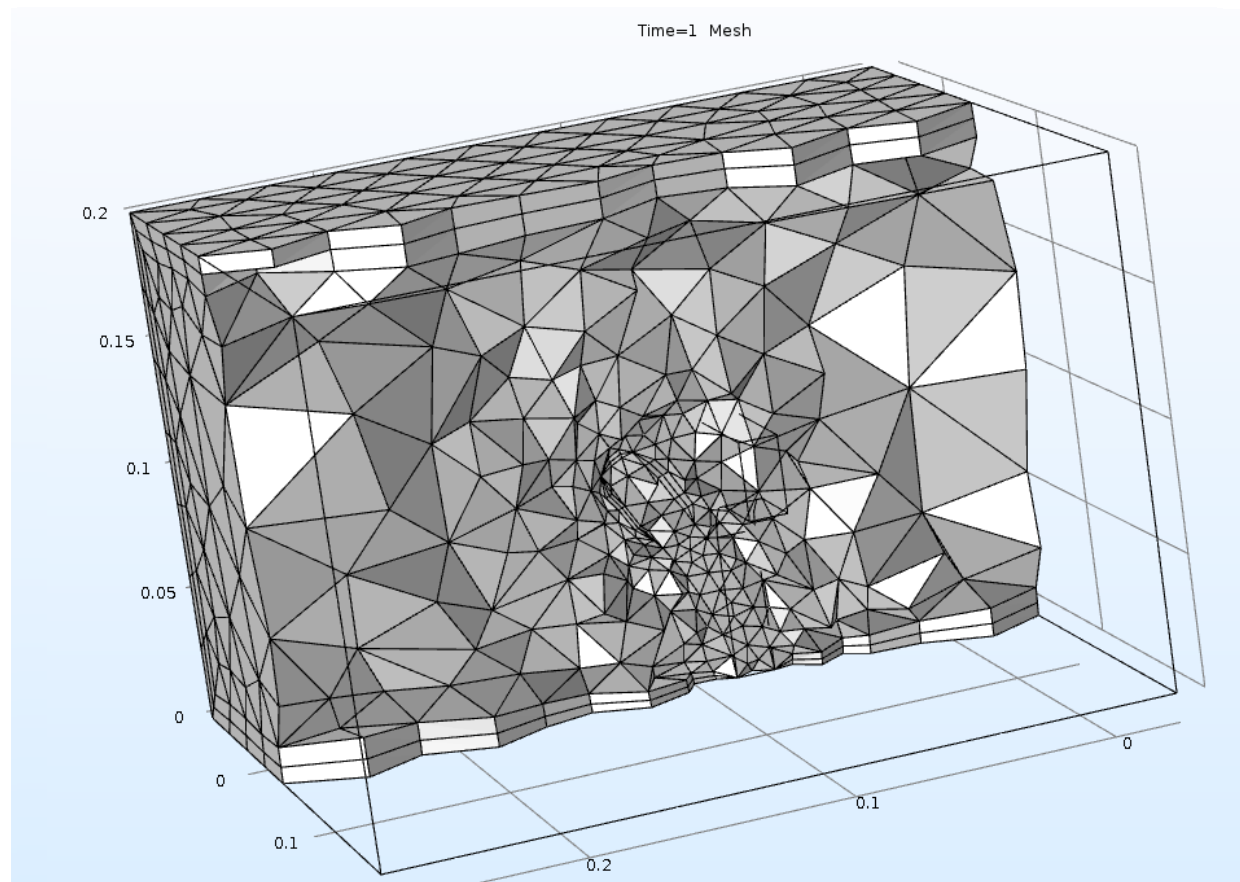
启用自动重新剖分网格



自动重新剖分网格设定

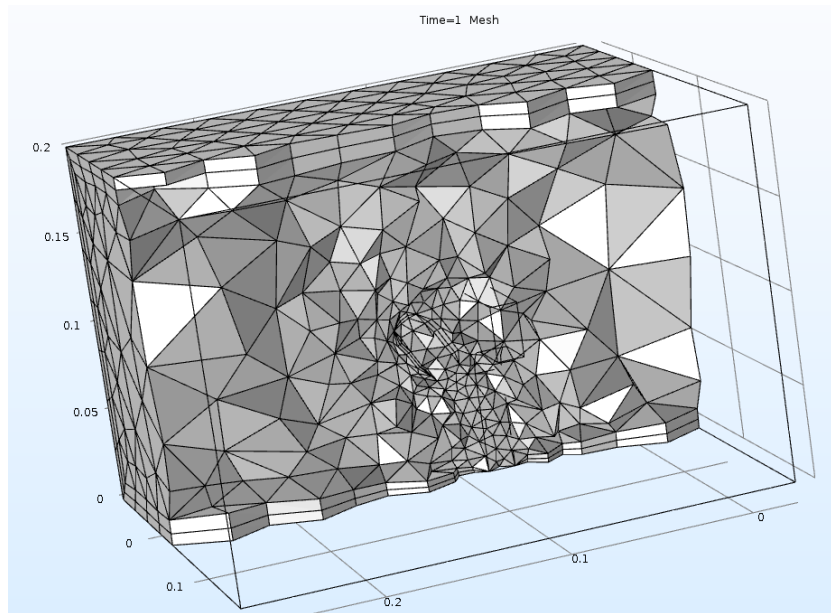


自动重新剖分网格

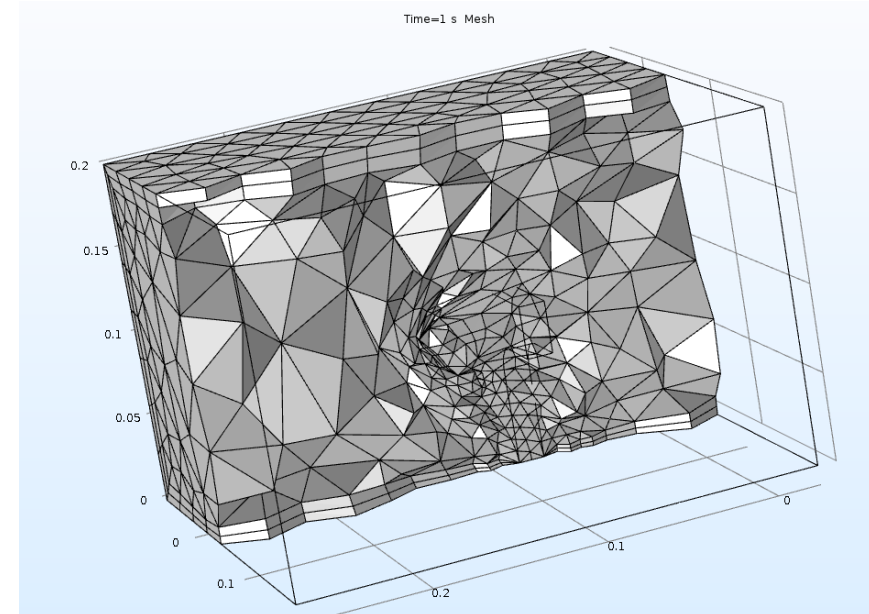


自动重新剖分网格

- 启用

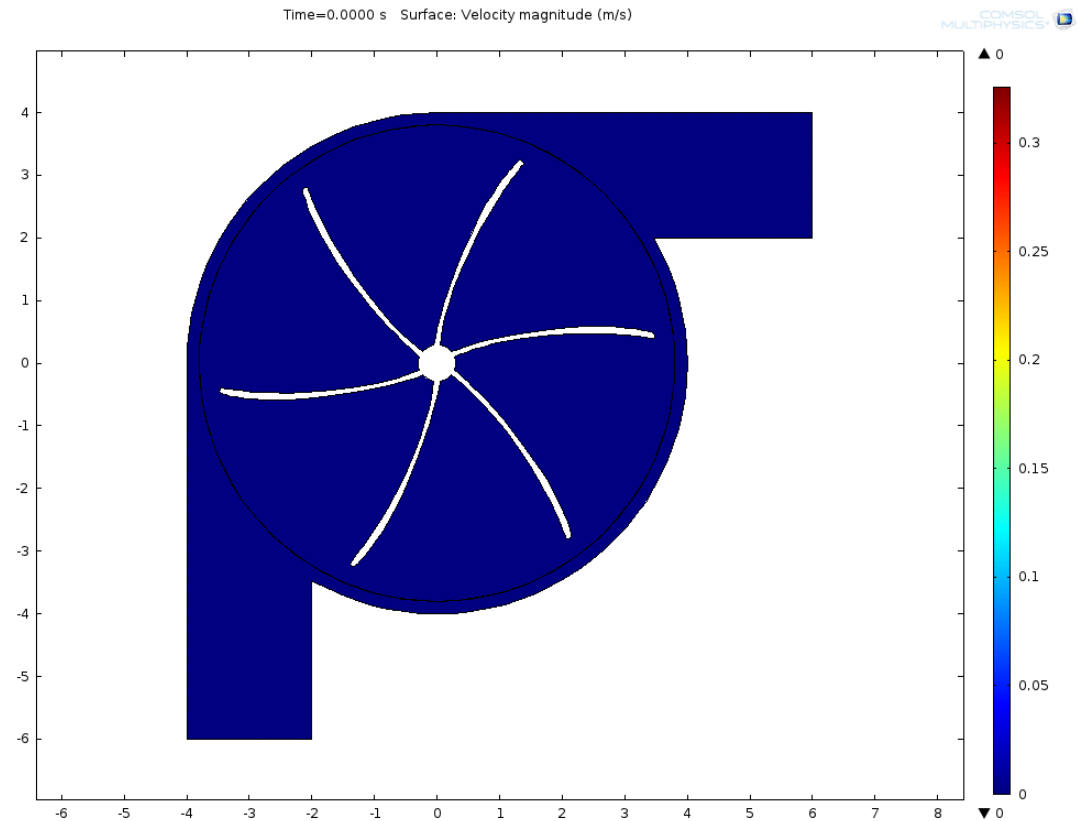


- 不启用



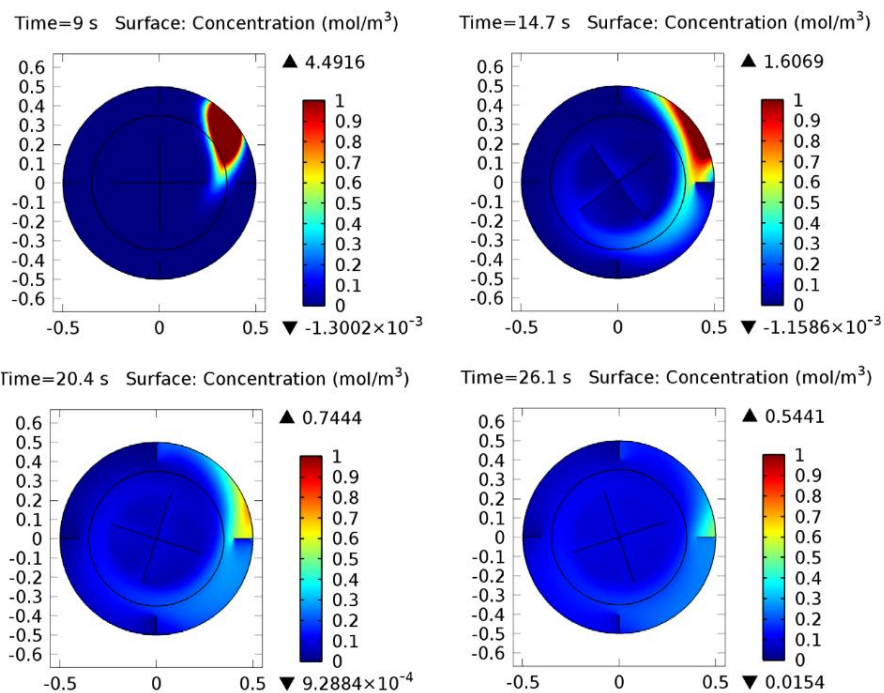
有刚性结构的FSI

- 静止的刚性结构
 - 计算作用在静态结构上的流体力
- 移动的刚性结构
 - 使用移动网格来表征固体的位移
 - 指定结构的位移 (e.g.: 旋转机械)
 - 通过计算ODE来得到刚体的运动
- 冻结转子求解器
 - 伪静态的静态充分发展流场，旋转的影响引起离心力和科氏力

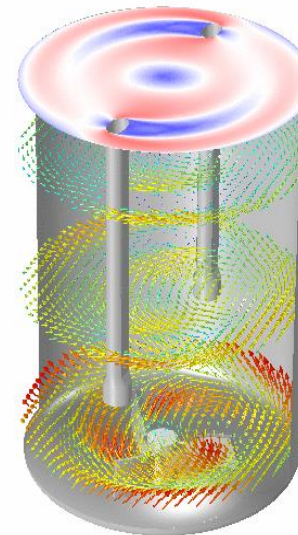


有刚性旋转结构的FSI

- 模型库中其他案例模型



搅拌容器中的湍流混合 (k-epsilon), 在这一点释放微量物质: 利用冻结转子求解器得到的准稳态结果作为瞬态模拟的初始条件



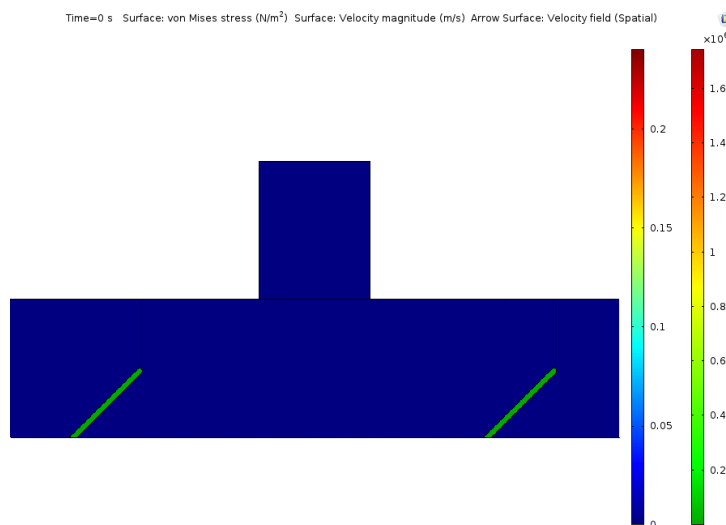
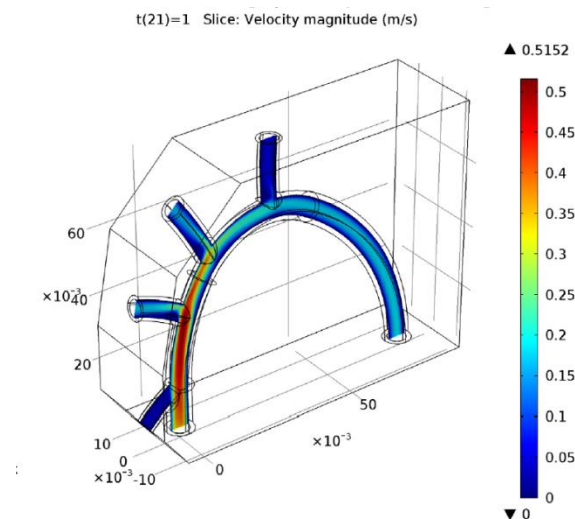
装备一个三叶片叶轮和两杆的混合器中的湍流混合。该模型还考虑了自由表面的形状

流固耦合案例

- App库中的其他案例



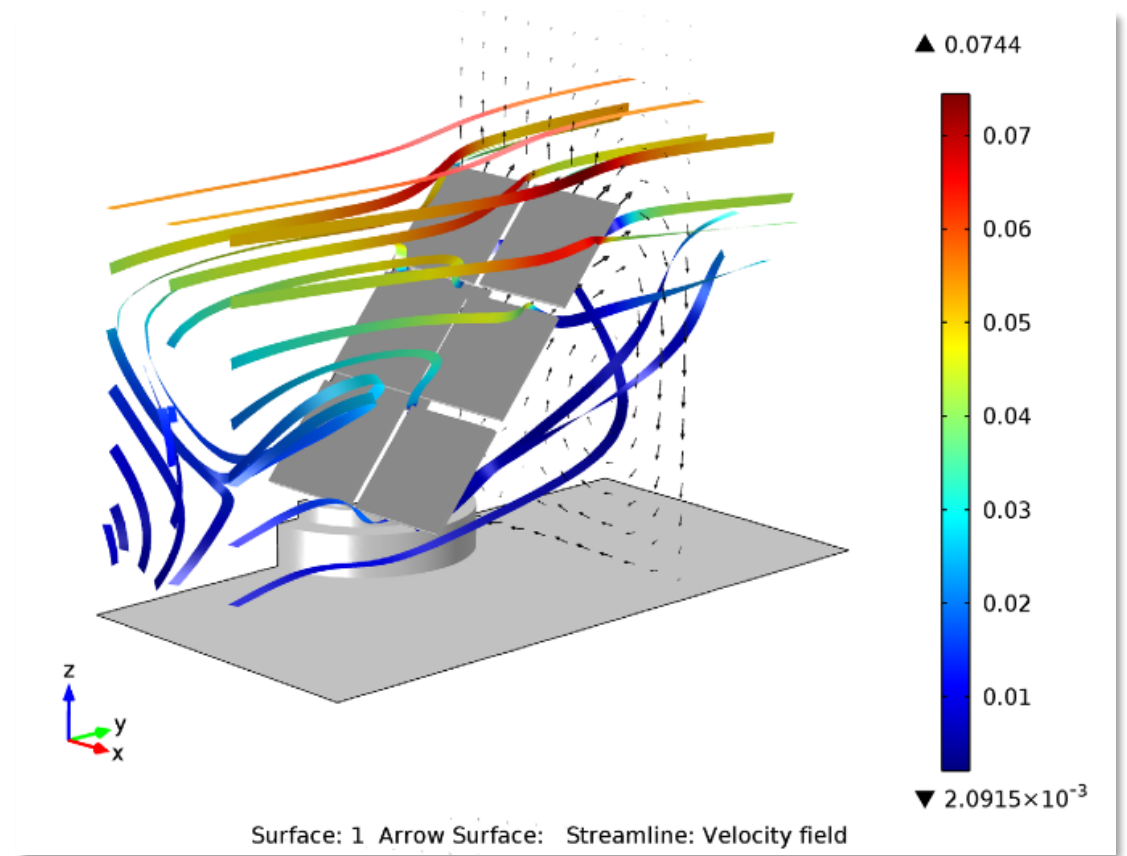
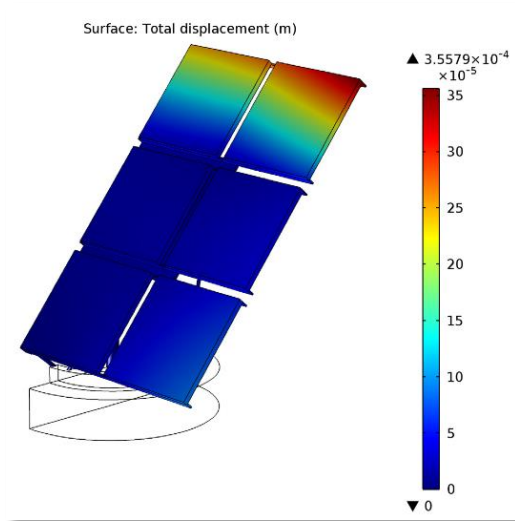
单向耦合
→
心肌动脉中的FSI



微流体: 无阀微泵中的双向 FSI. 震荡的流体进入通道. 在一致的方向上产生净流量

FSI: 湍流

- 周期性流动中的太阳能电池板
 - 使用k- ϵ 湍流模型计算湍流
 - 使用流体应力作为边界载荷加载到太阳能电池板上计算结构变形



FSI: 两相流

- 通过两个分离的研究步骤，并将流体力学作为边界条件用于固体力学分析，可以求解两相流和固体力学的单向耦合
- 双向的大变形两相流问题也可以手动耦合

