

# COMSOL Multiphysics®

## 计算流体力学（CFD）建模（在线课程）

### Part II

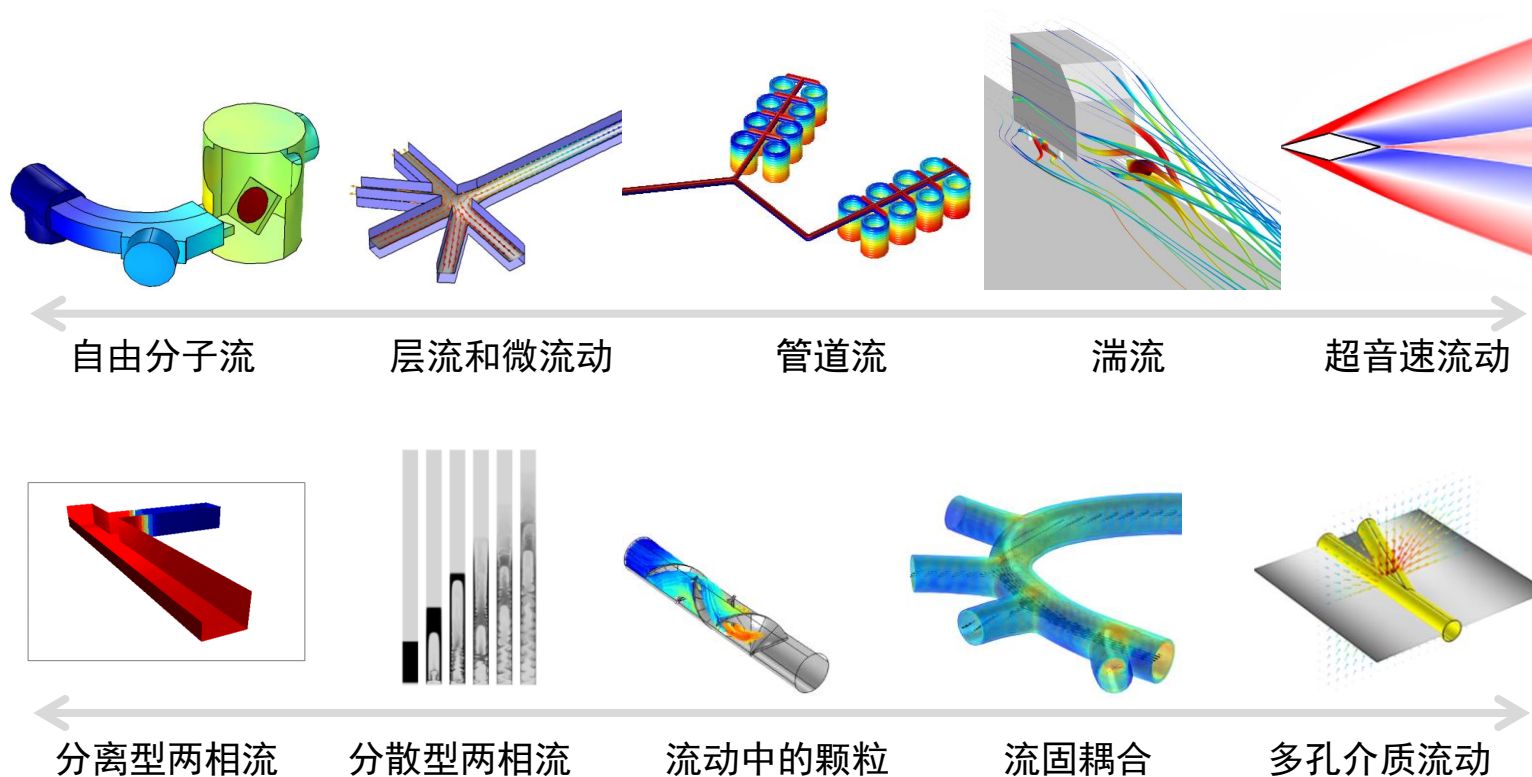
COMSOL 中国

张照

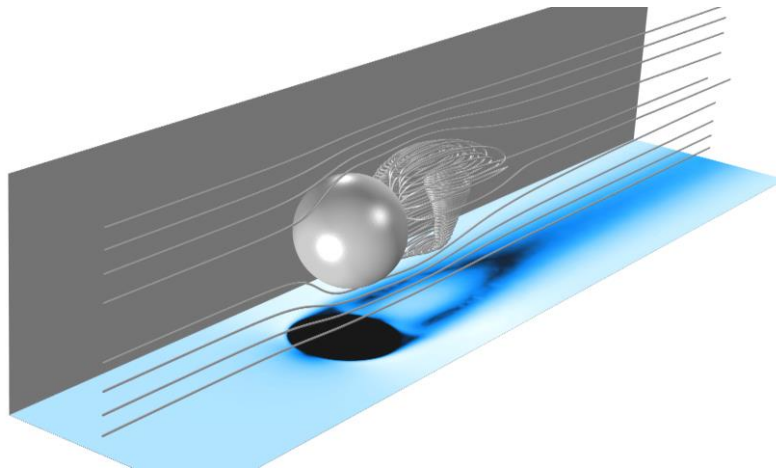
应用工程师

# 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
- 多相流仿真
- 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

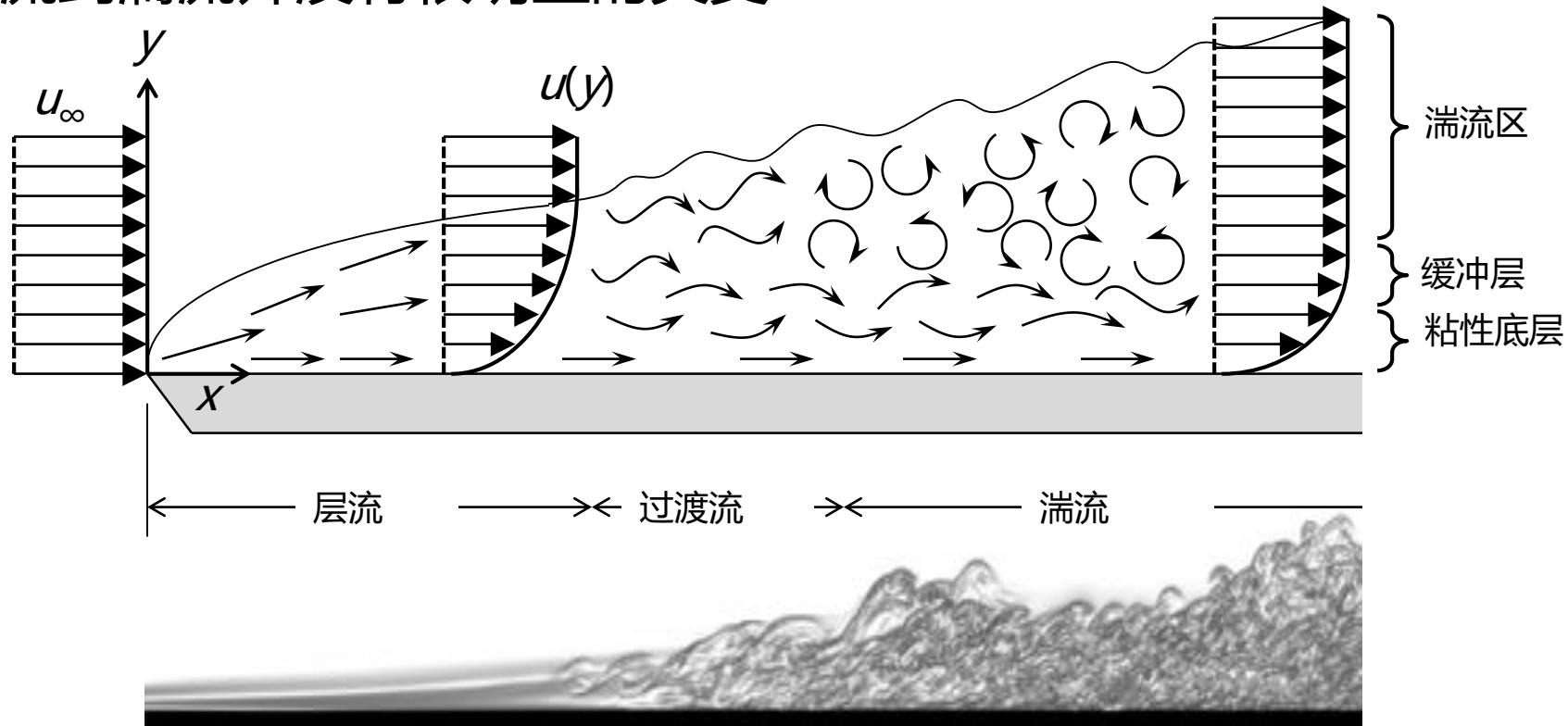


# 湍流



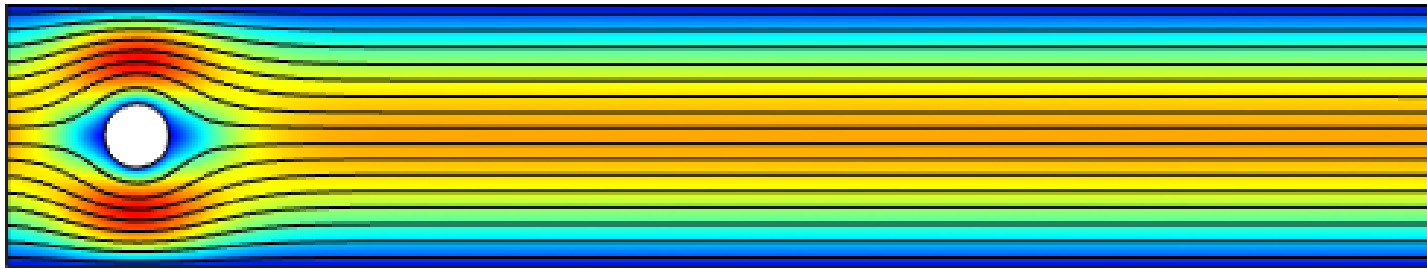
# 流动特征

- 流动可以分为层流或湍流
- 从层流到湍流并没有很明显的突变

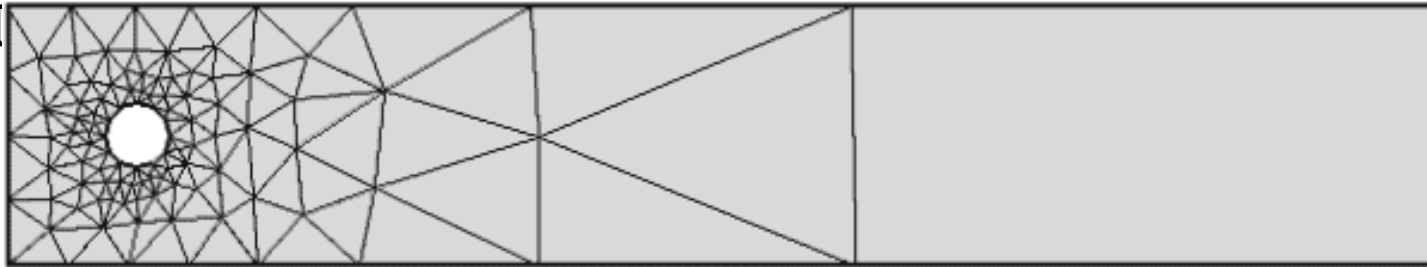


# 低雷诺数

- 如果是层流，可以求解完全的 Navier-Stokes 方程，预测流动（对称、稳定）



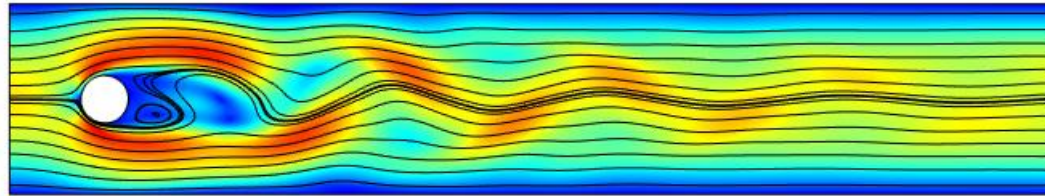
- 均匀矩形流道中的层流呈现出抛物型流动剖面，在流道中使用一个二阶单元就



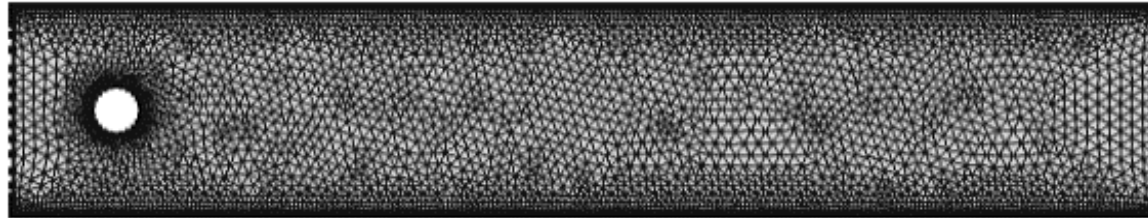
手动调整的网格，二阶单元

# 中等雷诺数

- 随着雷诺数增加，流动可能随时间开始振荡（非对称，不稳定）



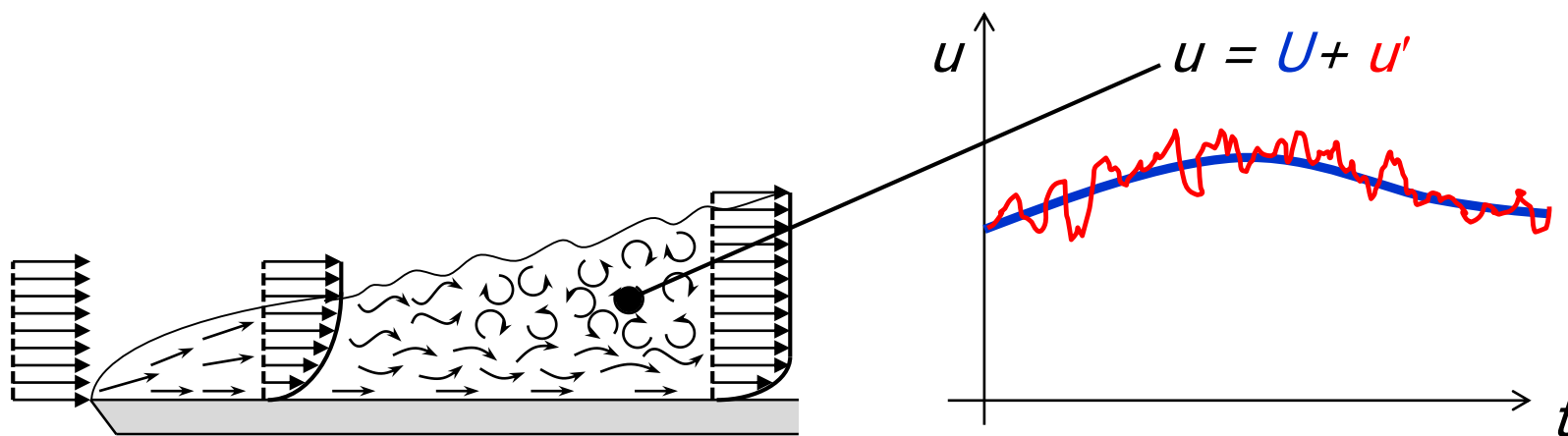
- 可能已经变得比较难于求解全 Navier-Stokes 方程
- 需要精细的网格来解析这些流场的扰动



缺省网格设定，一阶单元

# 高雷诺数

- 在更高的雷诺数，流动完全为湍流，呈现出时间上的混沌



- 雷诺平均 Navier-Stokes (RANS) 模型预测完全湍流区的流动在时间上平均的解
- RANS 可以在台式工作站级计算机上给出近似解

# 临界雷诺数

- 原则上，完全 Navier-Stokes 方程可以应用于所有的雷诺数
  - 但事实上，这些解可能观察不到

- 当  $Re \gtrsim Re_{crit}$  时流动变得不稳定，产生湍流状态

- 临界雷诺数依赖于不同的流动问题

- 外部流动：

$$Re_{crit} \approx 5 \cdot 10^5 \text{ 沿着平板边界}$$

$$Re_{crit} \approx 20'000 \text{ 障碍物周围}$$

- 内部流动：

$$Re_{crit} \approx 2300 \text{ (pipe)}$$

- 当计算和比较雷诺数时，确保使用一致和合适的变量  $\rho, U, L, \mu$

$$Re_L \equiv \frac{\rho UL}{\mu}$$

$$L = x, D, W, 4 \cdot A/P \dots$$



# 湍流 – 特征

- **远比层流复杂!**
  - 通常出现在高雷诺数
  - 总是非稳状态（扰动），三维和旋转
  - “混沌”本质：无序，明显的随机性和不可预测性
  - 流动的细节强烈依赖于初始条件
  - 强混合（动量、热和浓度的横向交换）
  - 高度耗散性：湍动能（大尺度）转换为热（小尺度）
  - 较大的空间尺度 and 时间尺度范围：
    - 最大的尺度  $L$ ：由流场的尺度决定（例如，管直径）
    - 最小的尺度  $l_K$ ：由运动粘度和湍流耗散率决定
    - 比例：  $L/l_K \propto Re^{3/4}$



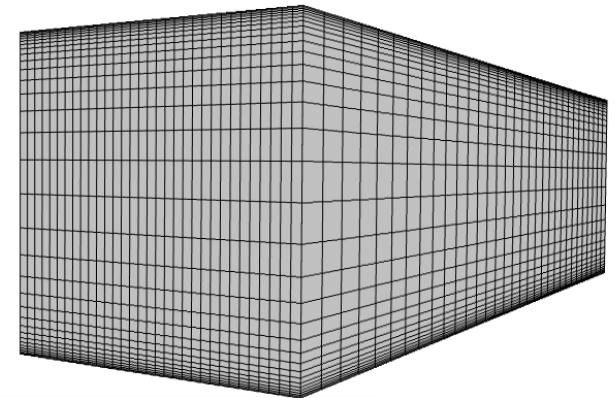
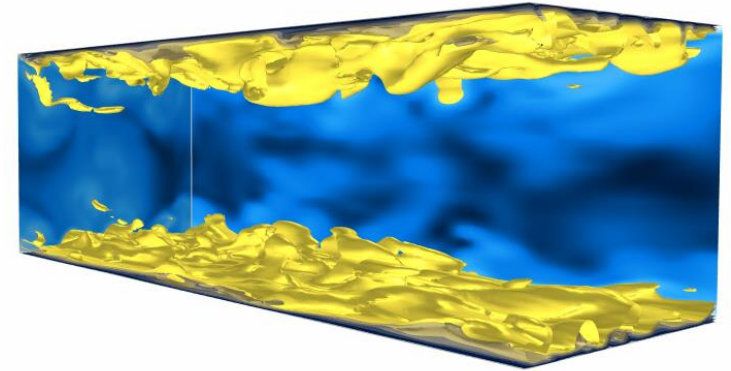
# 湍流 – DNS计算的成本

- DNS（直接数值模拟）

- 求解Navier-Stokes 方程可以用来模拟湍流
- 需要极大数量的单元来捕捉范围很宽的尺度
- 计算成本正比于：
$$\underbrace{(Re^{3/4})^3}_{\text{空间}} \cdot \underbrace{(Re^{3/4})}_{\text{时间}} = Re^3$$

- LES（大涡模拟）

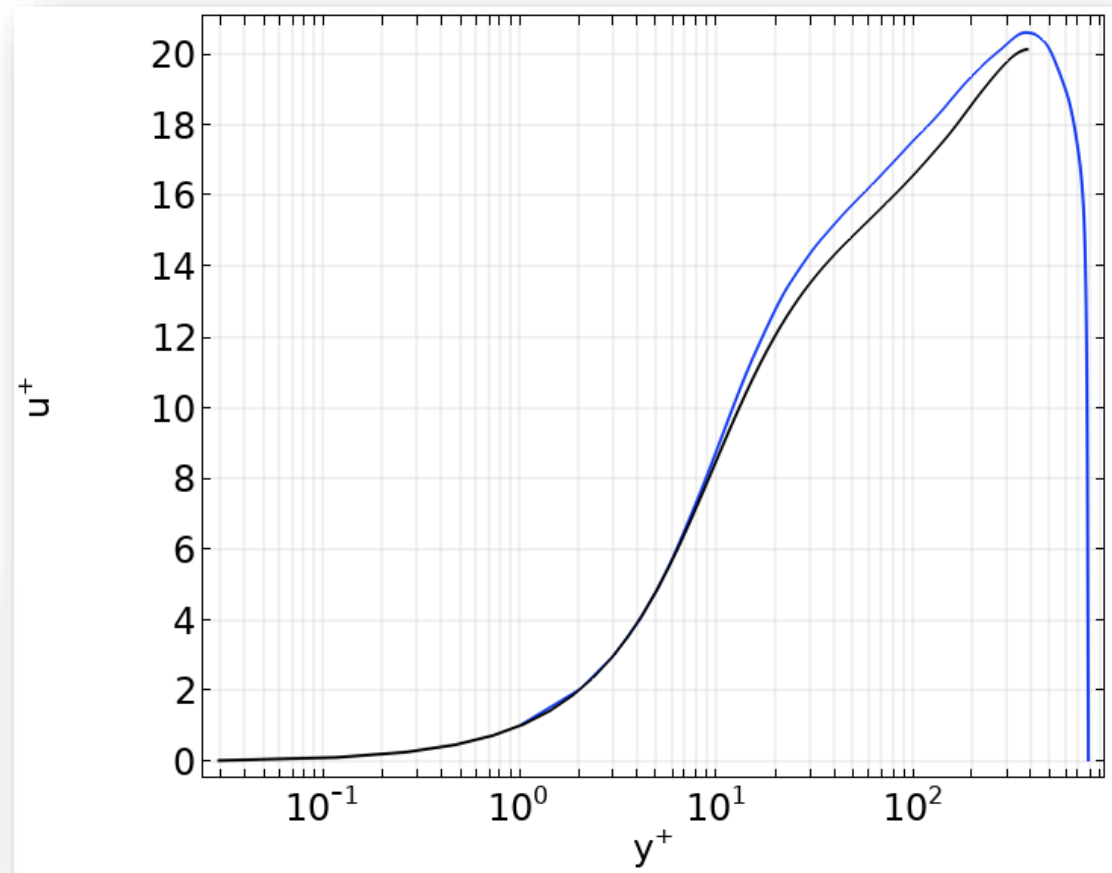
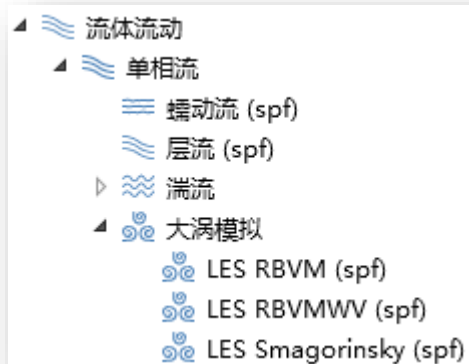
- 将流动分解为大（解析）尺度和小（未解析）尺度
- 小尺度通过湍流模型来模拟（计算成本较小）



32×32×32个二阶单元

# 大涡模拟（LES）

- 求解较大的三维瞬时涡（脉动），而对较小的涡使用模型
- 模型仅用于三维瞬态问题
- 精确但计算成本高
- 目前的三个接口都是基于变分多尺度方法（VMS）



# LES模型

- 将速度和压力变量分解为已求解尺度和未求解尺度

$$\mathbf{U} = \mathbf{u} + \mathbf{u}', P = p + p'$$

- 并且使用势函数的内积空间  $(\mathbf{v}, q)$  过滤未求解尺度

$$\begin{aligned} \left( \mathbf{v}, \rho \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} \right)_{\Omega} - (\nabla \cdot \mathbf{v}, p)_{\Omega} + (\nabla \mathbf{v} : \mu [\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T])_{\Omega} + (\nabla \cdot \mathbf{u}, q)_{\Omega} - (\mathbf{v}, \mathbf{f})_{\partial \Omega} = \\ (\nabla \cdot \mathbf{v}, p')_{\Omega} + (\nabla q, \mathbf{u}')_{\Omega} + (\nabla \mathbf{v}, \rho \{ \mathbf{u} \otimes \mathbf{u} + \mathbf{u} \otimes \mathbf{u}' + \mathbf{u}' \otimes \mathbf{u} + \mathbf{u}' \otimes \mathbf{u}' \})_{\Omega} \end{aligned}$$

- 基于残差的变分多尺度方法 (RBVM)

$$\mathbf{u}' = -\tau_m \mathbf{res}_m, p' = -\tau_c res_c$$

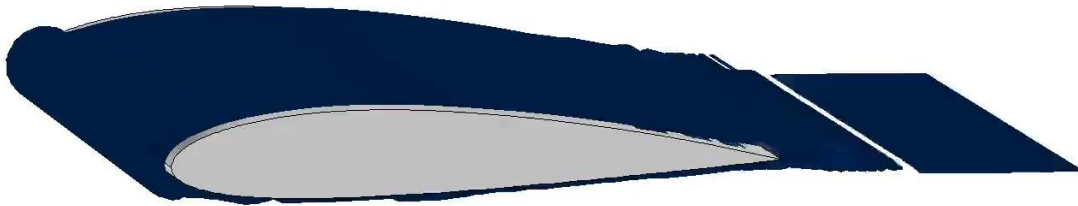
- 考虑粘性的RBVM (RBVMWV), 添加

$$(\nabla \mathbf{v} : \rho \tilde{C} |\mathbf{u}'| h [\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T])_{\Omega}$$

- Smagorinsky, 使用  $(\nabla \mathbf{v} : 2\rho C_s |\mathbf{S}| h^2 [\mathbf{S} - \bar{\mathbf{S}}])_{\Omega}$  替换

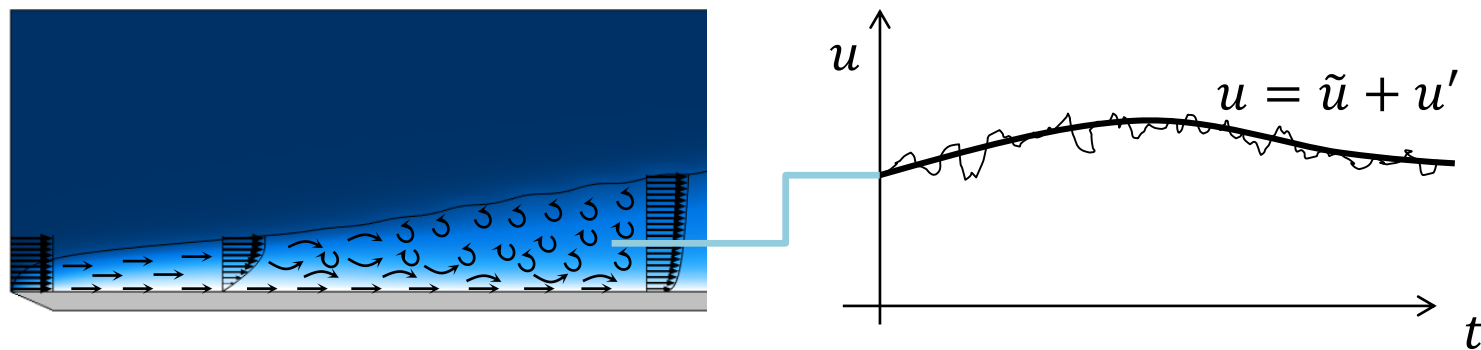
$$(\nabla \mathbf{v}, \rho \mathbf{u}' \otimes \mathbf{u}')_{\Omega}$$

# 机翼流场中的转捩与湍流



# RANS 方程

- 雷诺平均的 Navier-Stokes (RANS) 模型可以预测完全湍流流型的时间平均或全局平均的解



# 湍流模型

- COMSOL Multiphysics® 中所有的湍流模型都是基于 RANS 方程的

$$\bar{\rho} \left( \frac{\partial \tilde{\mathbf{u}}}{\partial t} + (\tilde{\mathbf{u}} \cdot \nabla) \tilde{\mathbf{u}} \right) = -\nabla \bar{p} + \nabla \cdot \left[ \bar{\mu} \left( \nabla \tilde{\mathbf{u}} + (\nabla \tilde{\mathbf{u}})^T - \frac{2}{3} (\nabla \cdot \tilde{\mathbf{u}}) \mathbf{I} \right) - \overline{\rho \mathbf{u}' \mathbf{u}'} \right] + \bar{\mathbf{F}}$$

- 使用 Boussinesq 涡粘假设

$$-\overline{\rho \mathbf{u}' \mathbf{u}'} = \mu_T \left( \nabla \tilde{\mathbf{u}} + (\nabla \tilde{\mathbf{u}})^T - \frac{2}{3} (\nabla \cdot \tilde{\mathbf{u}}) \mathbf{I} \right) - \frac{2}{3} \bar{\rho} k \mathbf{I}$$

# 基于RANS的湍流模型分类

- 代数方程（零方程）模型

- 代数  $\gamma$ Plus 模型

- 一方程模型

- Spalart-Allmaras 模型

- 两方程模型

- $k$ - $\epsilon$  模型
- $k$ - $\omega$  模型

- 四方程模型

- $v^2$ - $f$  模型

$$\text{Re}_w = \frac{\rho |\mathbf{u}_2| \ell_w}{\mu} = \frac{|\mathbf{u}_2|}{u_\tau} \cdot \frac{\rho u_\tau \ell_w}{\mu} = u^+ \ell_w^+, \quad u^+ = f(\ell_w^+)$$

$$\nabla G_2 \cdot \nabla G_2 + \sigma_w G_2 (\nabla \cdot \nabla G_2) = (1 + 2\sigma_w) G_2^4, \quad \ell_w = \frac{1}{G_2} - \frac{\ell_{\text{ref}}}{2}$$

$$\mu_\tau = \mu \left( \left( \frac{df}{d\ell_w^+} \right)^{-1} - 1 \right)$$

$$\frac{\partial \nu^t}{\partial t} + (\mathbf{u}_2 \cdot \nabla) \nu^t = C_{b1} S^t \nu^t - C_{w1} f_w \left( \frac{\nu^t}{\ell_w} \right)^2 + \frac{1}{\sigma_{\bar{\nu}}} \nabla \cdot ((\nu + \nu^t) \nabla \nu^t) + \frac{C_{b2}}{\sigma_{\bar{\nu}}} \nabla \nu^t \cdot \nabla \nu^t, \quad \nu^t = \text{nutilde}$$

$$\rho \frac{\partial k_2}{\partial t} + \rho (\mathbf{u}_2 \cdot \nabla) k_2 = \nabla \cdot \left[ \left( \mu + \frac{\mu_\tau}{\sigma_k} \right) \nabla k_2 \right] + P_k - \rho \epsilon$$

$$\rho \frac{\partial \epsilon}{\partial t} + \rho (\mathbf{u}_2 \cdot \nabla) \epsilon = \nabla \cdot \left[ \left( \mu + \frac{\mu_\tau}{\sigma_\epsilon} \right) \nabla \epsilon \right] + C_{\epsilon 1} \frac{\epsilon}{k_2} P_k - C_{\epsilon 2} \rho \frac{\epsilon^2}{k_2}, \quad \epsilon = \text{ep2}$$

$$\rho \frac{\partial \zeta}{\partial t} + \rho (\mathbf{u}_2 \cdot \nabla) \zeta = \nabla \cdot \left[ \left( \mu + \frac{\mu_\tau}{\sigma_\zeta} \right) \nabla \zeta \right] + \frac{2}{k} \left( \alpha^3 \mu + \frac{\mu_\tau}{\sigma_k} \right) \nabla k_2 \cdot \nabla \zeta + (1 - \alpha^3) f_w + \alpha^3 f_h - \frac{\zeta}{k_2} P_k$$

$$\alpha - L^2 \nabla^2 \alpha = 1, \quad L = C_L \max \left[ \frac{k^{3/2}}{\epsilon}, C_\eta \left( \frac{\nu^3}{\epsilon} \right)^{1/4} \right]$$



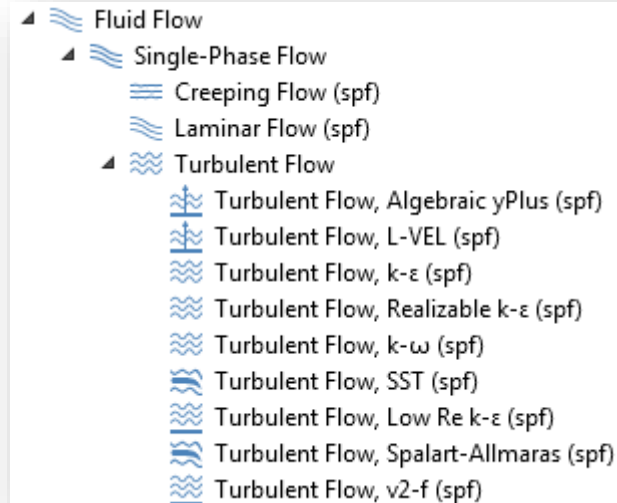
# RANS模型的湍流粘度

- RANS 模型在 Navier-Stokes 方程中增加了一个湍流粘度
- 不同的模型有不同的湍流粘度计算方法，以及不同壁函数处理方法

模型	求解	计算流场
Spalart-Allmaras	$\bar{u}$ : Spalart-Allmaras 粘度	全部
k- $\epsilon$	k: 湍流动能 $\epsilon$ : 动能耗散率	除了近壁
k- $\omega$	k: 湍流动能 $\omega$ : 动能比耗散率	除了近壁
低雷诺数 k- $\epsilon$	k: 湍流动能 $\epsilon$ : 动能耗散率	全部
SST	k: 湍流动能 $\omega$ : 动能比耗散率	全部

# 湍流接口

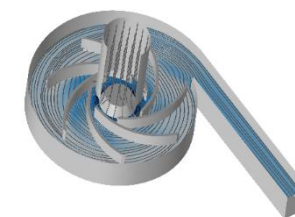
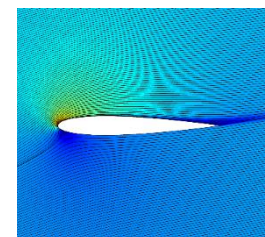
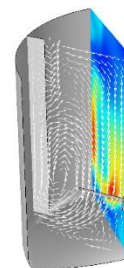
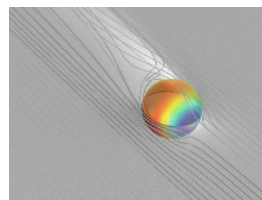
- 湍流
  - 代数 yPlus 模型
  - L-VEL 模型
  - k- $\epsilon$  模型
  - 可真实化的 k- $\epsilon$  模型
  - k- $\omega$  模型
  - SST 模型
  - 低雷诺数的 k- $\epsilon$  模型
  - Spalart-Allmaras 模型
  - $v^2$ -f 模型



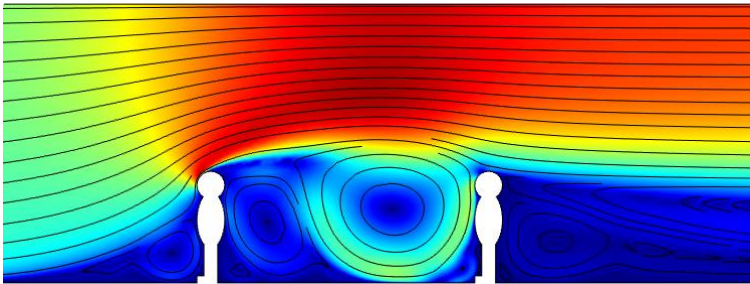
# 湍流模型的计算成本

- 代数  $\gamma$ Plus 和 L-VEL
- Spalart-Allmaras
- k-epsilon
- k-omega, SST
- 低雷诺数 k-epsilon
- 可真实化的 k-epsilon
- $v^2$ -f

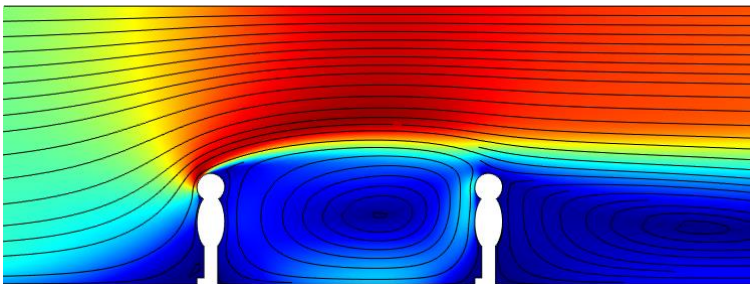
计算成本逐渐升高



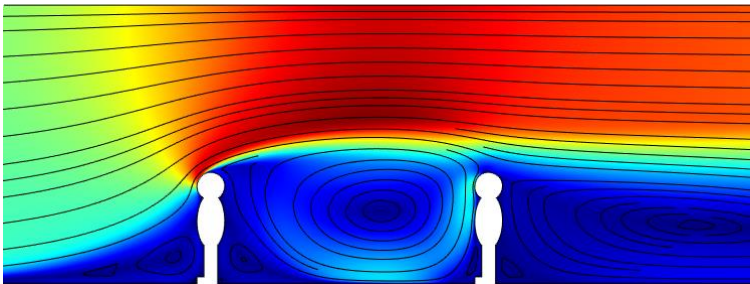
# 湍流模型的计算精度



Algebraic yPlus, 2 min 44 sec



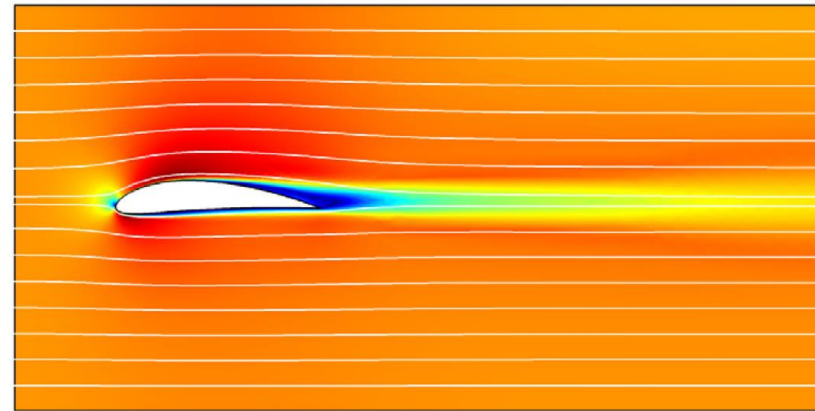
k-epsilon, 9 min 13 sec



low Re k-epsilon, 32 min 16 sec

# Spalart-Allmaras湍流模型

- Spalart-Allmaras 最初为空气动力学开发
- 优点：
  - 稳定，容易求解
  - 内存需求小于低雷诺数  $k-\epsilon$  和 SST
  - 不使用壁函数，因此可以精确计算：
    - 力（升力 & 曳力）
    - 流量（传热 & 质）
- 缺点：不能精确计算存在以下现象的流场：
  - 剪切流
  - 分离流
  - 衰变湍流



# $k$ - $\varepsilon$ 模型

- 工业应用中最广泛的湍流模型之一
- 两个额外的传递方程和两个因变量

– 湍流粘度:

$$\mu_T = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$$

– 湍动能 $k$  输运方程:

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho \mathbf{u} \cdot \nabla k = \nabla \cdot \left( \left( \mu + \frac{\mu_T}{\sigma_k} \right) \nabla k \right) + P_k - \rho \varepsilon$$

– 生成项:

$$P_k = \mu_T \left( \nabla \mathbf{u} : (\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T) - \frac{2}{3} (\nabla \cdot \mathbf{u})^2 \right) - \frac{2}{3} \rho k \nabla \cdot \mathbf{u}$$

– 湍动能耗散率 $\varepsilon$  输运方程:

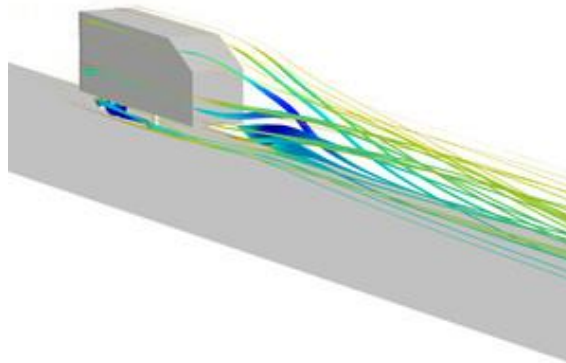
$$\rho \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \rho \mathbf{u} \cdot \nabla \varepsilon = \nabla \cdot \left( \left( \mu + \frac{\mu_T}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right) + C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} P_k - C_{\varepsilon 2} \rho \frac{\varepsilon^2}{k}$$

- 湍流模型参数通过实验数据确定
- 常数可能不适用于所有体系

CONSTANT	VALUE
$C_\mu$	0.09
$C_{\varepsilon 1}$	1.44
$C_{\varepsilon 2}$	1.92
$\sigma_k$	1.0
$\sigma_\varepsilon$	1.3

# $k-\varepsilon$ 湍流模型

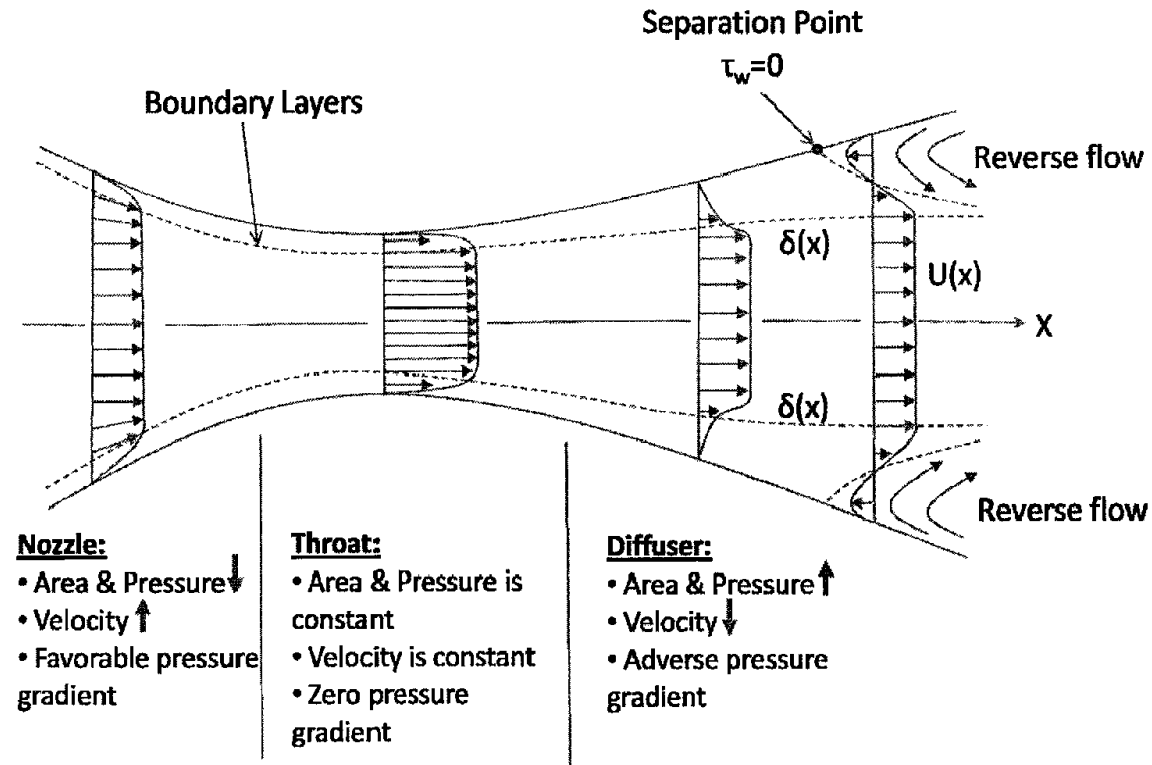
- $k-\varepsilon$  模型常用于工业模型计算
  - Re足够大
  - 平衡湍流：湍动能的生成与耗散相同
- 优点：
  - 稳定，容易求解
  - 可以在壁附近使用较粗的网格
  - 对于外部流动问题，复杂几何等有良好的表现



- 缺点：
  - 由于使用壁函数近似，壁附近的解不够精确
    - 升力、曳力、传热 & 传质
  - 不能精确计算存在以下现象的流场：
    - 逆压梯度
    - 具有强曲率的流动
    - 射流

# 逆压梯度

- 收缩/扩张管
- 边界层分离
- 后台阶流





# Realizable k-ε 湍流模型

- 当平均应变率较大时，标准的k-ε无法准确预测耗散尺度，则

$$\mu_T = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$$

$C_\mu = 0.09$ 不成立

- $C_\mu$ 为随应变率变化的变量而不是常数

$$C_\mu = \frac{1}{A_0 + A_s U^{(*)} \frac{k}{\varepsilon}}$$

$$A_s = \sqrt{6} \cos\left(\frac{1}{3} \arccos(\sqrt{6} W)\right), \quad W = \frac{2\sqrt{2} S_{ij} S_{jk} S_{ki}}{S^3}, \quad U^{(*)} = \sqrt{S_{ij} S_{ij} + \Omega_{ij} \Omega_{ij}}, \quad \Omega_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right)$$

- 满足可真实化约束

$$\overline{u_i^2} \geq 0$$

$$\frac{\overline{u_i u_j}^2}{\overline{u_i^2} \overline{u_j^2}} \leq 1$$

- 优点

- 在模型流型中精度较高：圆管射流
- 湍流的一致性更好

# $k$ - $\omega$ 湍流模型

- 广泛使用的湍流模型
  - CFD模块使用 Wilcox 修订  $k$ - $\omega$  模型
- 两方程湍流模型，求解：
  - 湍流动能  $k$ ：类似于  $k$ - $\varepsilon$ （参见 CFD 模块 User' s Guide)
  - 单位湍动能的耗散率  $\omega$ ：比耗散率
- $k$ - $\varepsilon$  和  $k$ - $\omega$  的混合长度限制
  - 直接通过湍动能和耗散率计算湍流粘性会出现除零错误
  - 混合长度用来计算湍流粘度
  - 混合长度存在上限

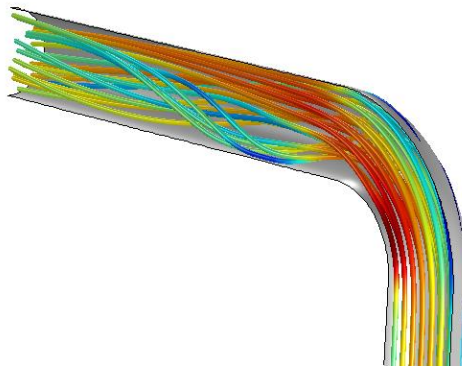
$$\mu_T = \rho \frac{k}{\omega}$$



$$l_{\text{mix}} = \max\left(C_\mu \frac{k^{3/2}}{\varepsilon}, l_{\text{mix}}^{\text{lim}}\right)$$

# $k$ - $\omega$ 湍流模型

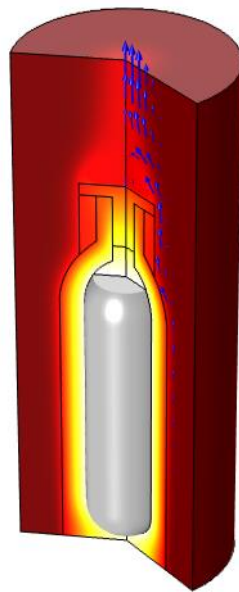
- $k$ - $\omega$  模型是对  $k$ - $\epsilon$  模型的改进
- 优点：
  - 与  $k$ - $\epsilon$  相同的内存需求
  - 对于内部流动问题表现良好
  - 当存在以下现象时可以更精确地计算流场：
    - 具有强曲率的流动
    - 分离流
    - 逆压梯度
    - 喷射



- 缺点：
  - 由于壁函数近似，壁附近的解不够精确：
    - 升力、曳力、传热 & 质
  - 对于外流问题，对自由来流（进口处）的  $\omega$  值敏感
  - 与  $k$ - $\epsilon$  模型相比较难收敛
    - 常常使用  $k$ - $\epsilon$  模型来提供初始条件

# 低雷诺数 $k-\varepsilon$ 湍流模型

- 低雷诺数  $k-\varepsilon$  模型求解直到壁的所有区域
- 优点：
  - $k-\varepsilon$  模型的扩展，常常用来随后获得更高精度的解
  - 不使用壁函数，计算以下结果时更精确：
    - 力（升力 & 曳力）
    - 壁面通量（传热 & 传质）



- 缺点：
  - 需要更精细的边界层网格
  - 需要良好的入口/初始条件来提高收敛性
  - 雷诺数较高时，边界层网格必须非常精细
  - 需要内存高于  $k-\varepsilon$  和  $k-\omega$ 
    - 求解直到壁的所有区域

# SST 湍流模型

- SST: 剪切应力传递
- 两方程低雷诺数 RANS 模型

$$\rho \frac{dk}{dt} + \rho \mathbf{u} \cdot \nabla k = \nabla \cdot ((\mu + \sigma_k \mu_T) \nabla k) + P - \beta_0^* \rho \omega k$$

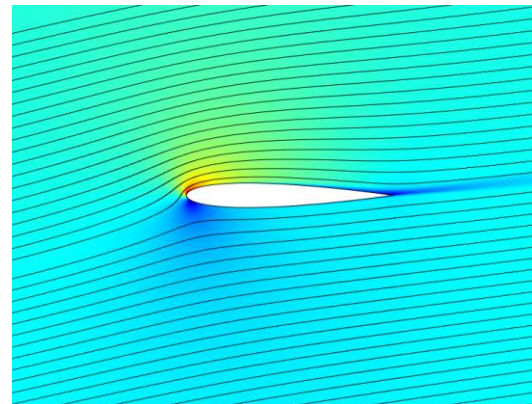
$$\rho \frac{d\omega}{dt} + \rho \mathbf{u} \cdot \nabla \omega$$

$$= \nabla \cdot ((\mu + \sigma_\omega \mu_T) \nabla \omega) + \frac{\gamma}{\mu_T} \rho P - \rho \beta \omega^2 + \underbrace{2(1 - f_{v1}) \frac{\sigma_\omega 2\rho}{\omega} \nabla k \cdot \nabla \omega}_{\text{"混合项"}}$$

- 组合了自由流体的 k-ε 模型和近壁的 k-ω 模型, 不求解壁函数

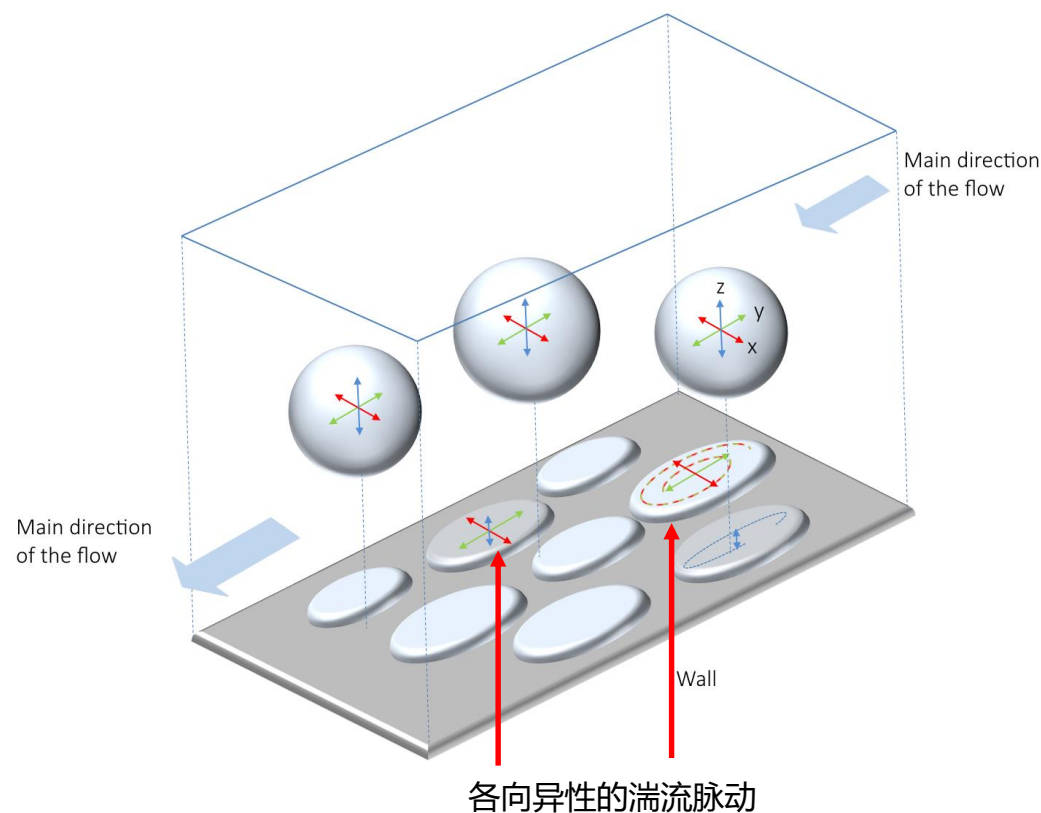
# SST 湍流模型

- SST 求解直到壁的所有区域的  $k-\omega$
- 优点：
  - 组合自由流体中的  $k-\varepsilon$  模型和近壁的  $k-\omega$  模型
  - 对边界条件不敏感
  - 满足可真实化约束
  - 趋向于更精确地求解壁
  - 不使用壁函数，计算以下变量更精确：
    - 力 (升力)
    - 流量 (传热 & 质)
- 缺点：
  - 需要仔细选择初始条件
  - $Re$  较高时，需要精细的边界层网格
  - 旋流
  - 内存需求高于  $k-\varepsilon$  或  $k-\omega$  (边界层)



# $v^2$ -f 湍流模型

- 基于k- $\epsilon$ 模型的扩展，通过求解流线法向的湍流速度脉动来考虑湍流的各项异性
  - 流线（壁面）法向方向的湍流脉动的输运方程
  - 使用椭圆方程描述湍流各项异性的弛豫，受到壁面的约束作用



# $v^2$ -f 湍流模型

- COMSOL中使用的 $v^2$ -f模型将因变量进行变换的 $\zeta - \alpha$ 模型

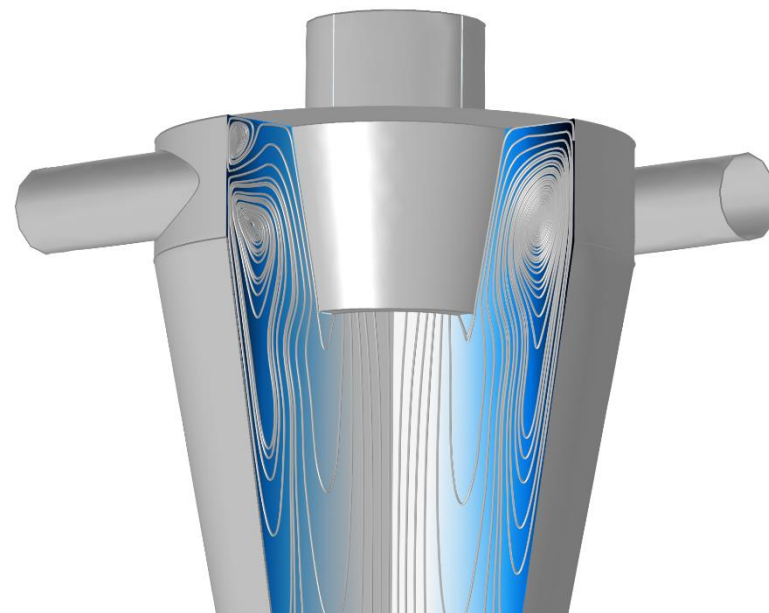
- $v^2$  代表流线法向的速度脉动  $\zeta = \frac{\overline{v^2}}{k}$

$$\rho \frac{\partial \zeta}{\partial t} + \rho \mathbf{u} \cdot \nabla \zeta = \nabla \cdot \left( \left( \mu + \frac{\mu_T}{\sigma_{\zeta v^2 f}} \right) \nabla \zeta \right) + \frac{2}{k} \left( \alpha^3 \mu + \frac{\mu_T}{\sigma_{kv^2 f}} \right) \nabla k \cdot \nabla \zeta - \frac{\zeta}{k} P_k + \alpha^3 f_h + (1 - \alpha^3) f_w$$

- f 代表湍动能向  $v^2$  转换的比例

$$f = \alpha^3 f_h + (1 - \alpha^3) f_w \quad \nabla^2 \alpha = \frac{\alpha - 1}{L^2}$$

- 用于各项异性湍流
  - 例如，具有弯曲壁面的流场



水力离心分离器中的流动，在这个典型的案例中， $v^2$ -f模型比两方程模型，例如k- $\epsilon$ 或SST模型，可以给出更好的结果。



# Which Turbulence Model Should I Choose?

## 针对 CFD 应用选择合适的湍流模型



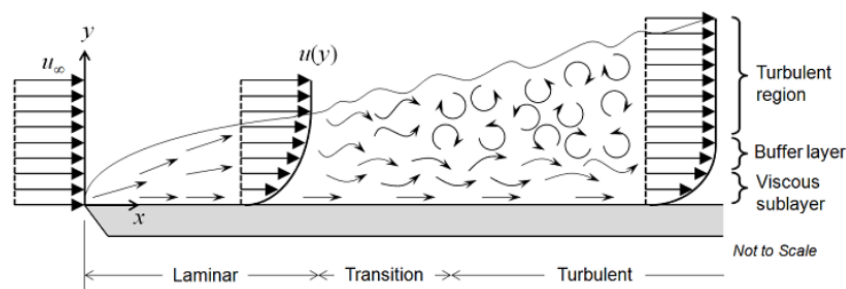
Walter Frei 2017年7月6日

COMSOL Multiphysics® 提供了多个不同的湍流问题求解公式：L-VEL、algebraic yPlus、Spalart-Allmaras、k- $\epsilon$ 、k- $\omega$ 、低雷诺数 k- $\epsilon$ 、SST 以及 v2-f 湍流模型。所有这些公式都可以在“CFD 模块”中调用，L-VEL、algebraic yPlus、k- $\epsilon$  和低雷诺数 k- $\epsilon$  则在“传热模块”中可用。本博客简要介绍了我们为何要使用这些不同的湍流模型，如何从中选择，以及如何有效使用它们。

本博客首次发布于2013年。COMSOL® 软件5.3 版本的“CFD 模块”发布了新的湍流模型，最新的博客收录了所有的湍流模型。

### 湍流模拟简介

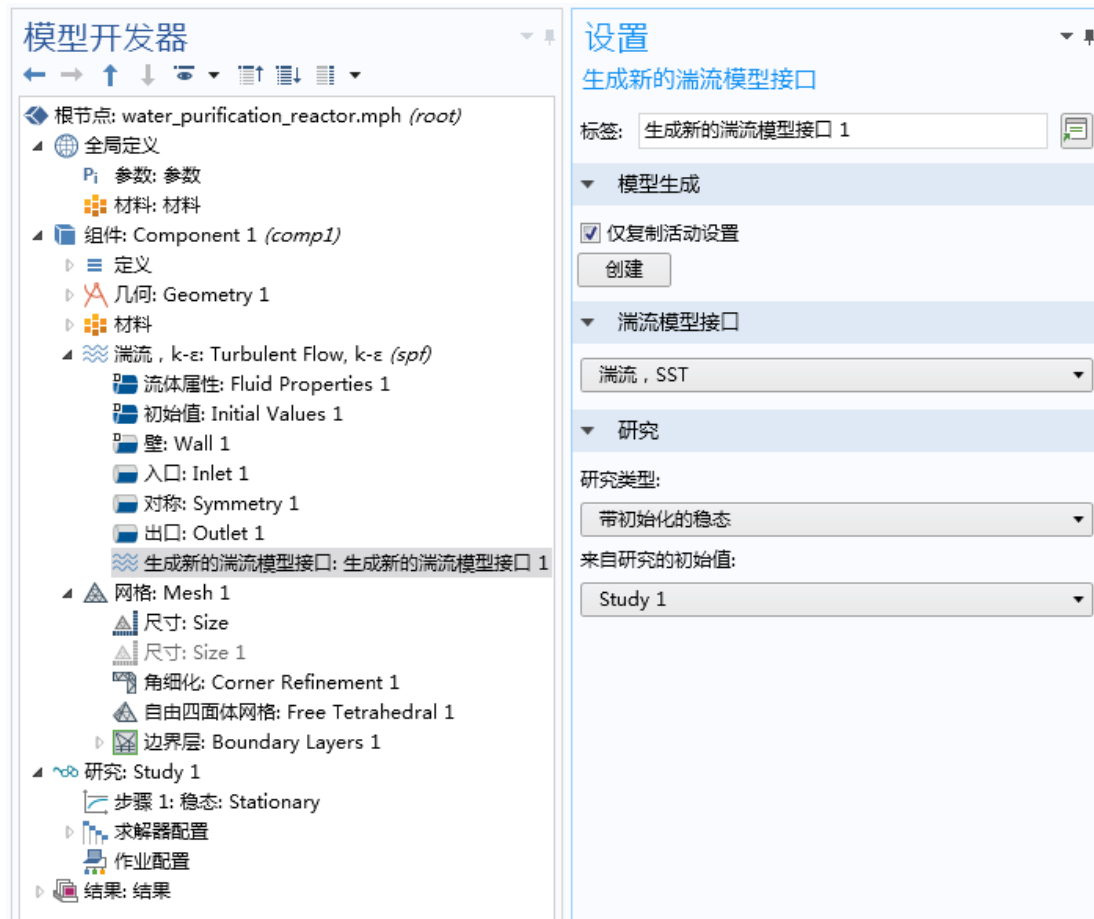
让我们先从平板上的流体流动说起，如下图所示。匀速流体接触到平板的前缘，开始形成一个层流边界层。该区域的流动很容易预测。经过一段距离后，边界层中开始出现较小的混沌振荡，流动开始转变为湍流，并最终完全转变为湍流。



- 博客：  
[www.comsol.com/blogs/which-turbulence-model-should-choose-cfd-application/](http://www.comsol.com/blogs/which-turbulence-model-should-choose-cfd-application/)
- 如果不确定哪一个更适合，可以尝试使用不同的湍流模型（从最简单的开始）并对比。
- 参考文献中的模型
- 联系COMSOL技术支持

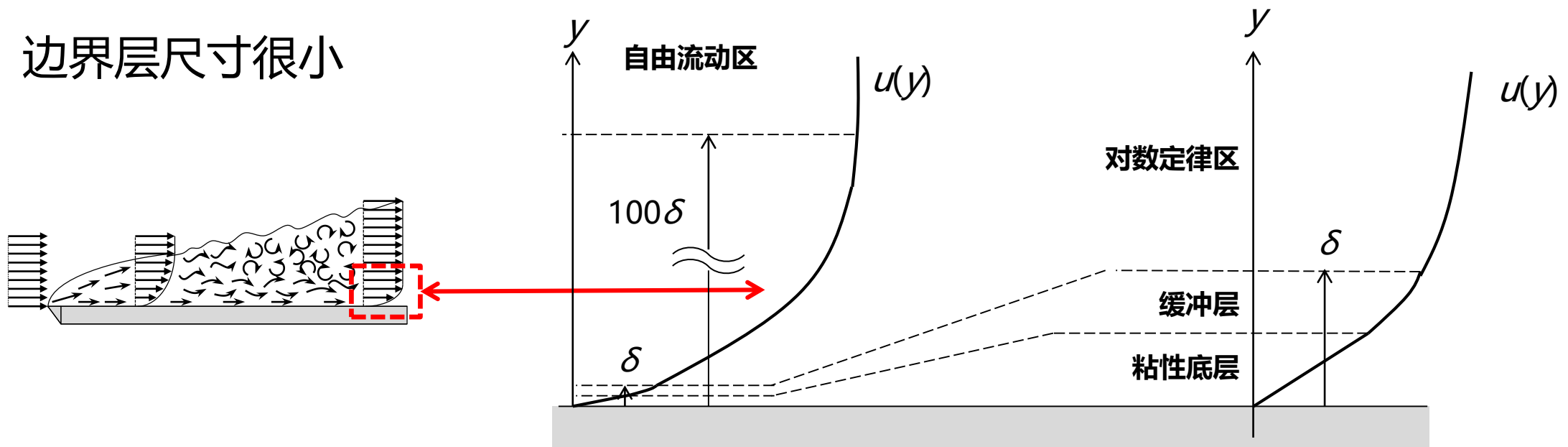
# 湍流模型间自动切换

- 成功的求解策略：
  - 从一个简单而鲁棒性高的模型开始
  - 将模型迁移到一个更准确、更敏感而计算成本高的模型
  - 自动将当前的结果作为新模型的初始值



# 湍流边界层

- 靠近壁面，湍流可以分为三个区域
- 边界层的速率梯度很大
- 边界层尺寸很小

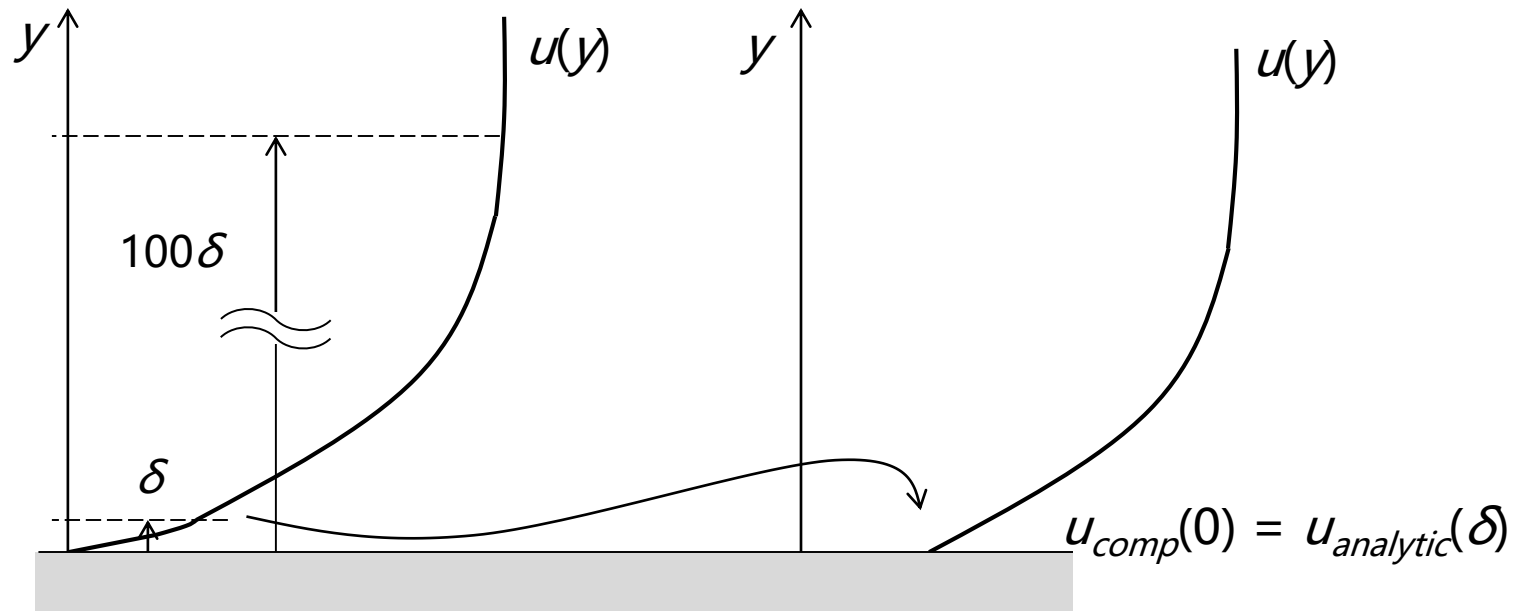


# 壁函数

- 解析的壁函数计算到缓冲层下沿的边界条件（壁和对数定律层之间尺寸为  $\delta$  的间隙）

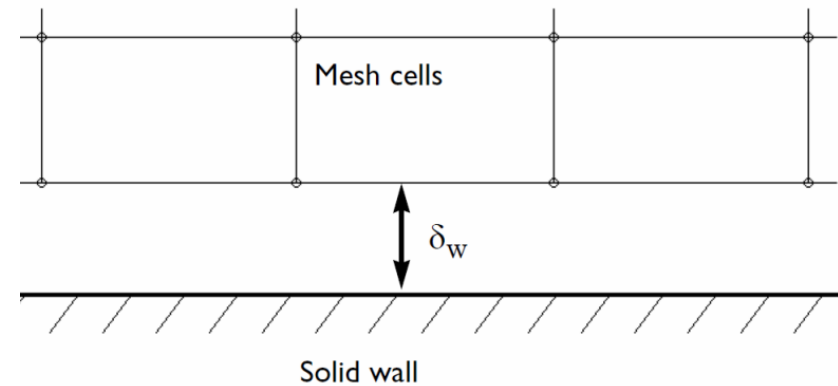
真正的流场

当使用壁函数时  
计算的流场



# 壁函数 ( $k-\varepsilon$ 和 $k-\omega$ )

- 在湍流中，如果不使用专门的壁模型，很难求解靠近壁的大梯度变化
- 壁函数假设计算域从壁的距离  $\delta_w$  开始
- $\delta_w$  为自动计算的结果



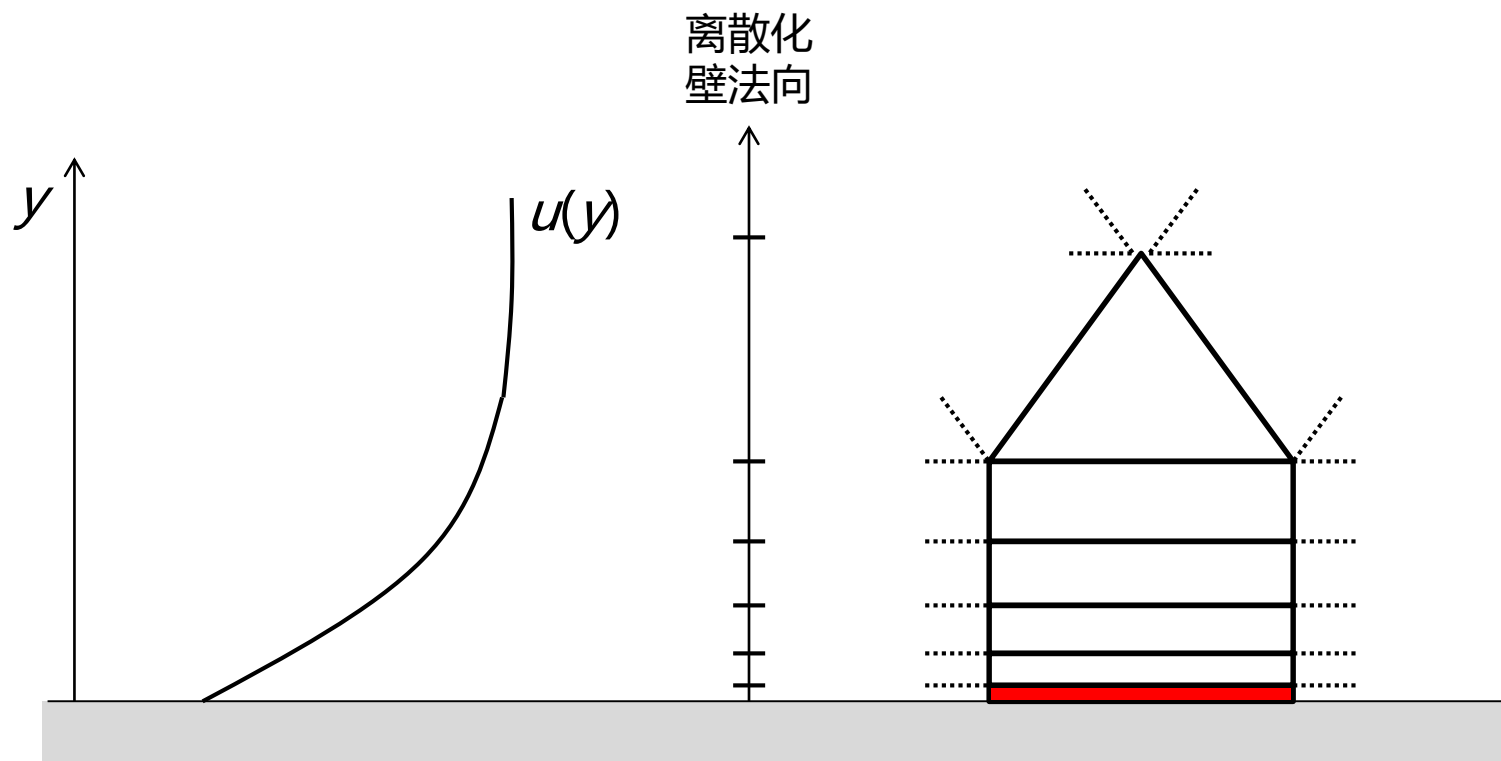
$$\delta_w^+ = \rho u_\tau \delta_w / \mu = 11.06$$

$u_\tau$ : 摩擦速度

最好在每次计算完成后检查  $\delta_w$ ，比较它是否相对于几何尺寸足够小，合理的结果是  $\delta_w^+$  在绝大多数壁等于 11.06。如果在很多壁上  $\delta_w^+$  很高（大于 50 或 100），计算精度可能存在问题。这两个变量都是预置变量，可以在结果和分析变量中找到它们。

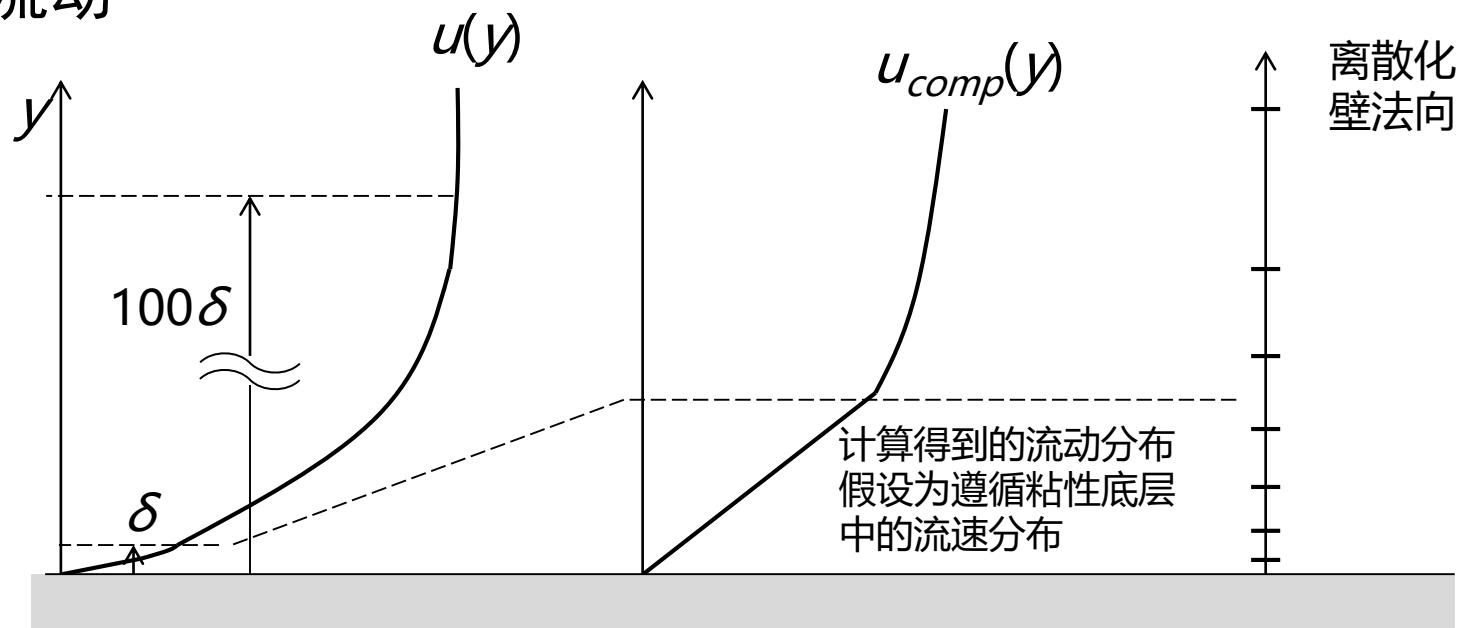
# 合理地进行边界层网格剖分

- 第一层单元的尺寸应该小于或接近  $\delta$  （法向方向）



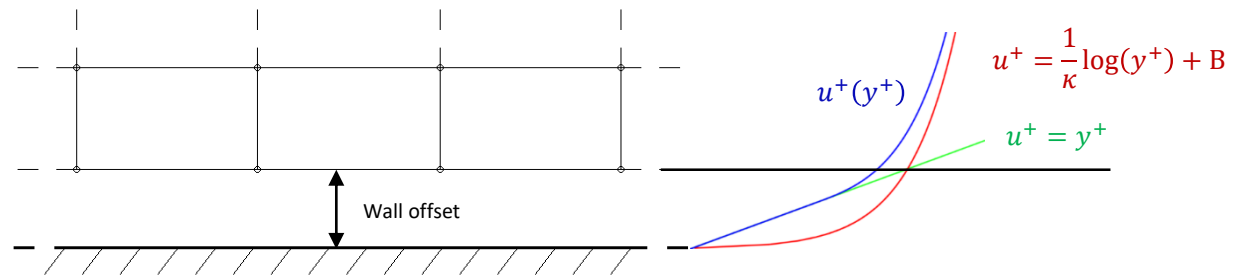
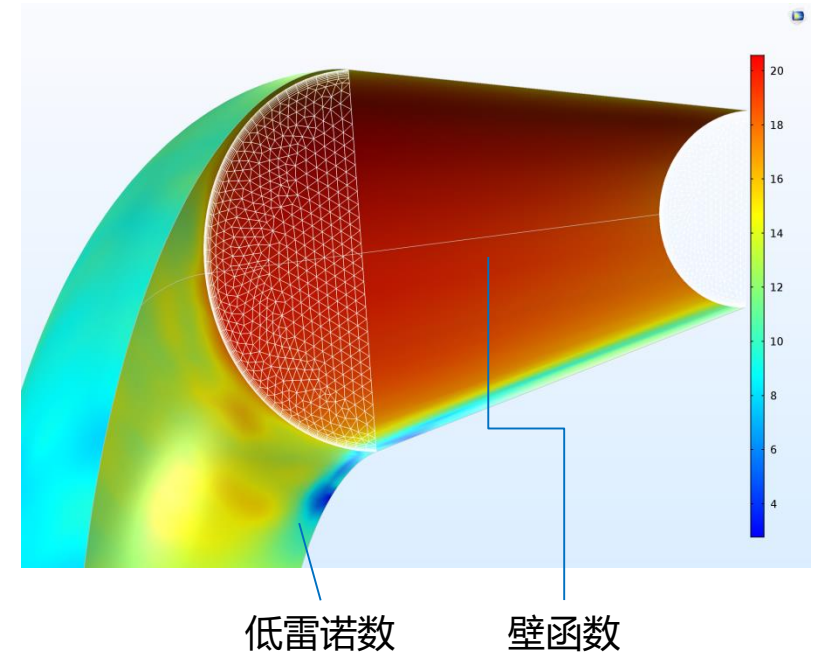
# 合理的边界层网格

- 当不需要壁函数时，流体需要求解直到壁的所有区域，因此需要相当精细的网格
- 当使用 Spalart-Allmaras、低雷诺数  $k-\epsilon$ 、SST模型时，需要很多网格来解析粘性底层的流动



# 壁处理

- 壁函数：应用壁平移
  - 计算域从对数区开始计算
- 低雷诺数处理：必须对粘性底层进行解析
- 自动壁处理：应用壁平移
  - 计算域可以从边界层的任意位置开始
  - 在低雷诺数壁处理和壁函数之间切换
  - 由网格解析度决定计算精度
  - 继承了壁函数的鲁棒性





# 入口条件：湍流长度&强度

- 除了入口流速，还需要定义湍流程程（狄氏边界），例如，定义  $k$  和  $\varepsilon$
- 或者指定湍流长度  $L_T$  和湍流强度:  $I_T$

流动情况	$L_T$	$L$
混合层	$0.07L$	层宽
平面射流	$0.09L$	喷口半宽
尾迹	$0.08L$	尾迹宽度
轴对称射流	$0.075L$	喷口半宽
边界层 ( $\partial p / \partial x = 0$ )		
– 粘性底层和对数层	$\kappa l_w (1 - \exp(-l_w^+ / 26))$	边界层厚度
– 外层	$0.09L$	
管道和水道 (充分发展流动)	$0.07L$	管道直径或水道宽度

其中  $l_w$  是壁距离,  $l_w^+ = l_w / l^*$  是粘性单位壁距离

- 低湍流强度: 0.1%
- 风洞: 0.05%
- 充分湍流: 5% - 10%

湍流条件

☐ 指定湍流长度和强度

☒ 指定湍流变量

湍流动能:

$k_0$    $\text{m}^2/\text{s}^2$

湍流耗散率:

$\epsilon_0$    $\text{m}^2/\text{s}^3$

湍流条件

☒ 指定湍流长度和强度

☐ 指定湍流变量


湍流强度:

$I_T$   1

湍流长度:

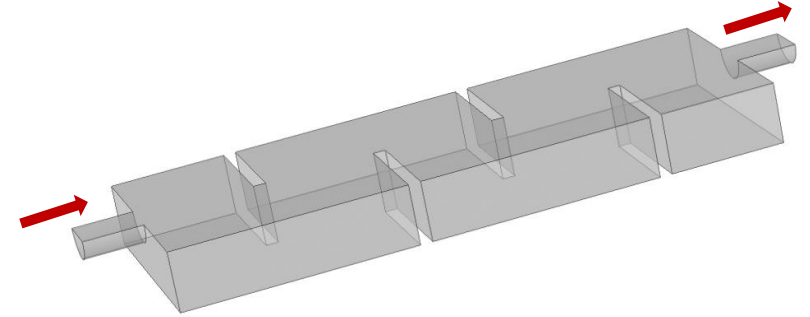
$L_T$   m

# 湍流模型的总结

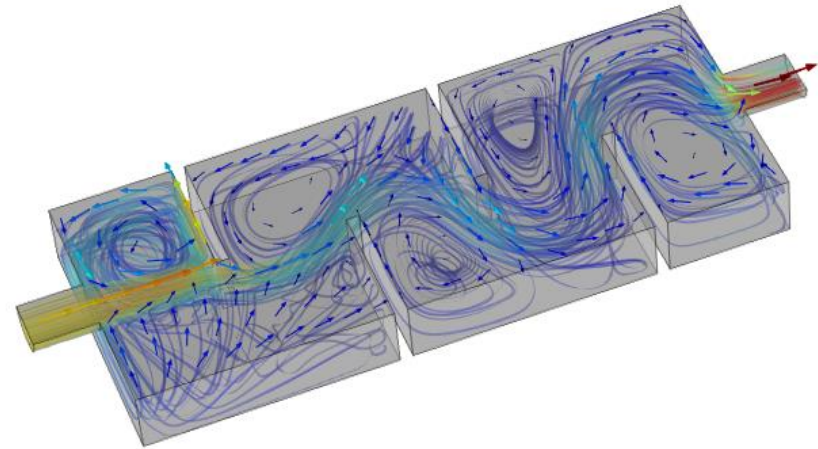
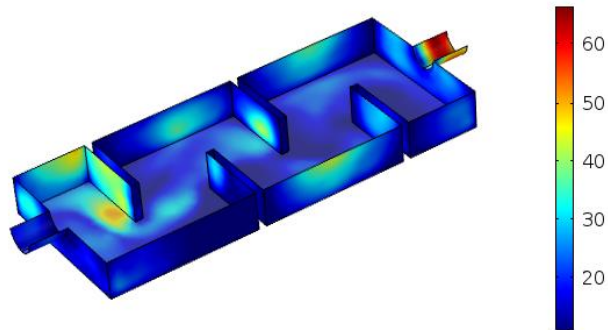
- 湍流模型提供了统计的描述和引入了经验性的物理量
  - 通过选择精细的网格或边界层网格确保边界得到足够好的解析，使用壁函数可能会很方便，但是不抵消这种必要性！
  - 您需要在入口给出额外的输入物理量：
    - 湍流长度尺度
    - 湍流强度
-  V5.4参考手册P.206
- 湍流的宏观效应是增加的质量、动量和能量的扩散通量
  - 在传递方程中，必须校正热传导和扩散系数！

# 案例演示

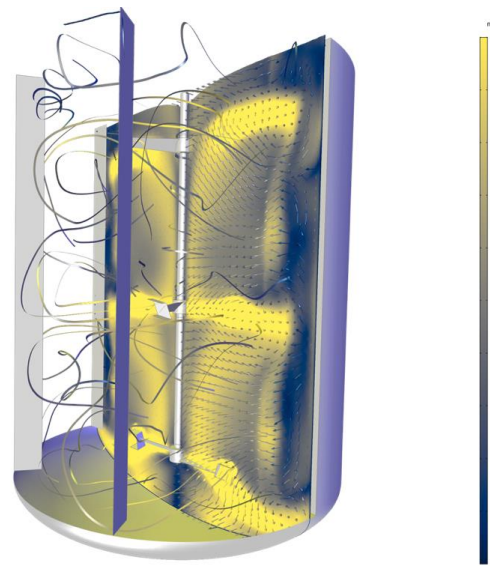
- 水处理反应器的流场分析
  - 在反应器中添加折流板增强物质组分的湍流混合



表面: 无量纲壁分辨率 (1)

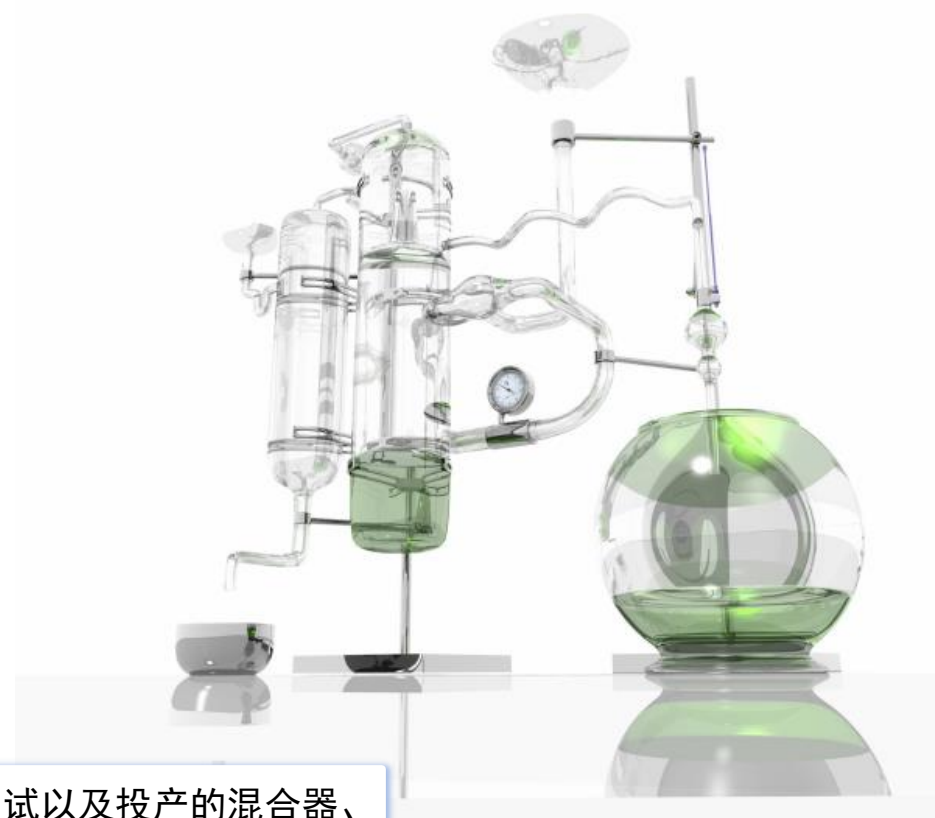


# 旋转机械流动



# 典型应用

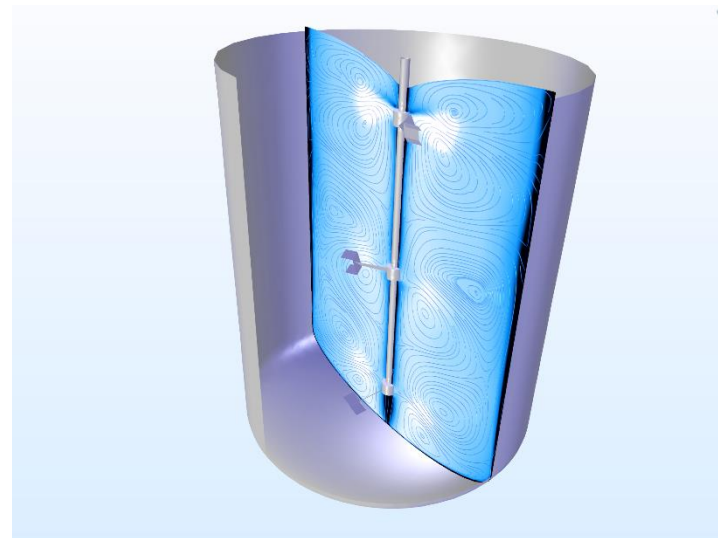
- 预测混合器、搅拌釜、釜式反应器中的组分和温度分布
  - 精细化工
  - 制药
  - 消费品，如肥皂、洗发液、牙膏、化妆品
  - 食品加工
- 预测旋转机械中的压力损耗与流动  
( $Ma < 0.3$ )



搅拌器模块用于实验室、中试以及投产的混合器、搅拌釜和釜式反应器等的仿真

# 内容

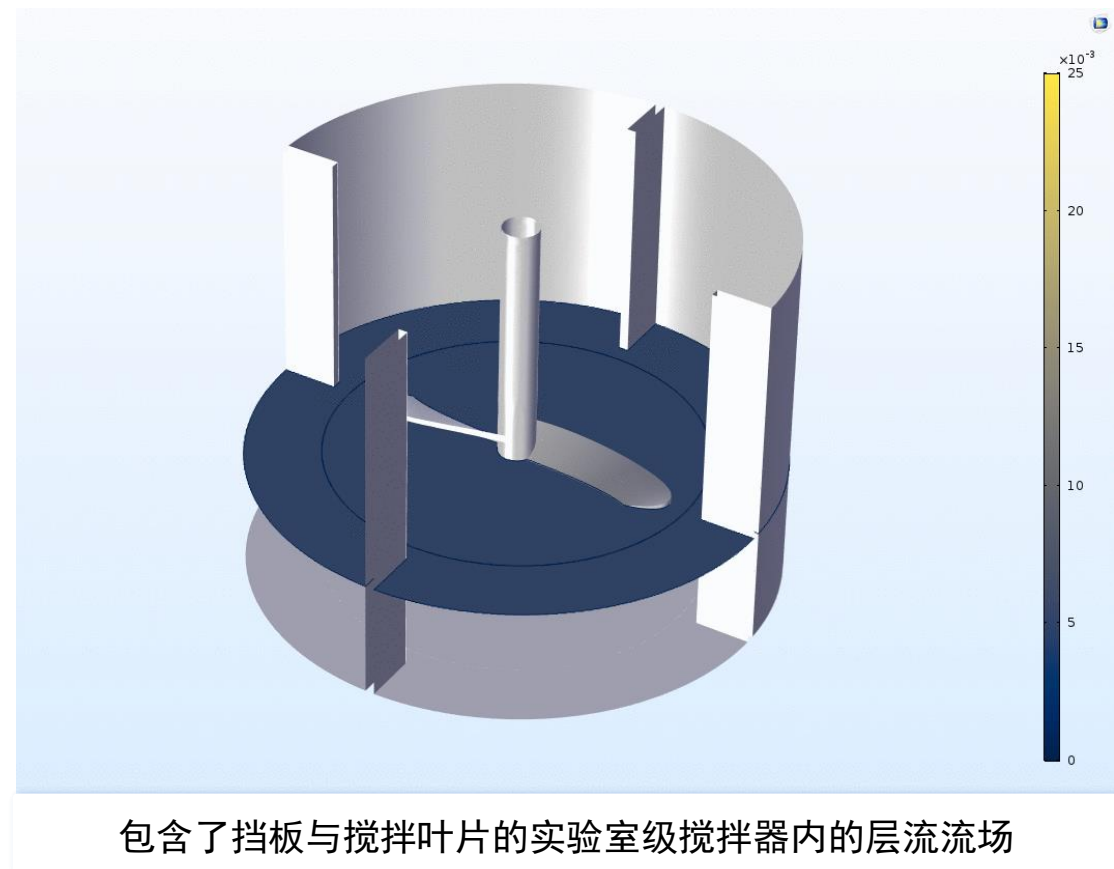
- 旋转机械中的层流与湍流
- 基于RANS的湍流模型
- 搅拌器模块零件库
- 旋转机械多物理场接口
  - 非等温流
  - 反应流
  - 多相流
- App库和搅拌器App



搅拌器中的湍流和自由液面

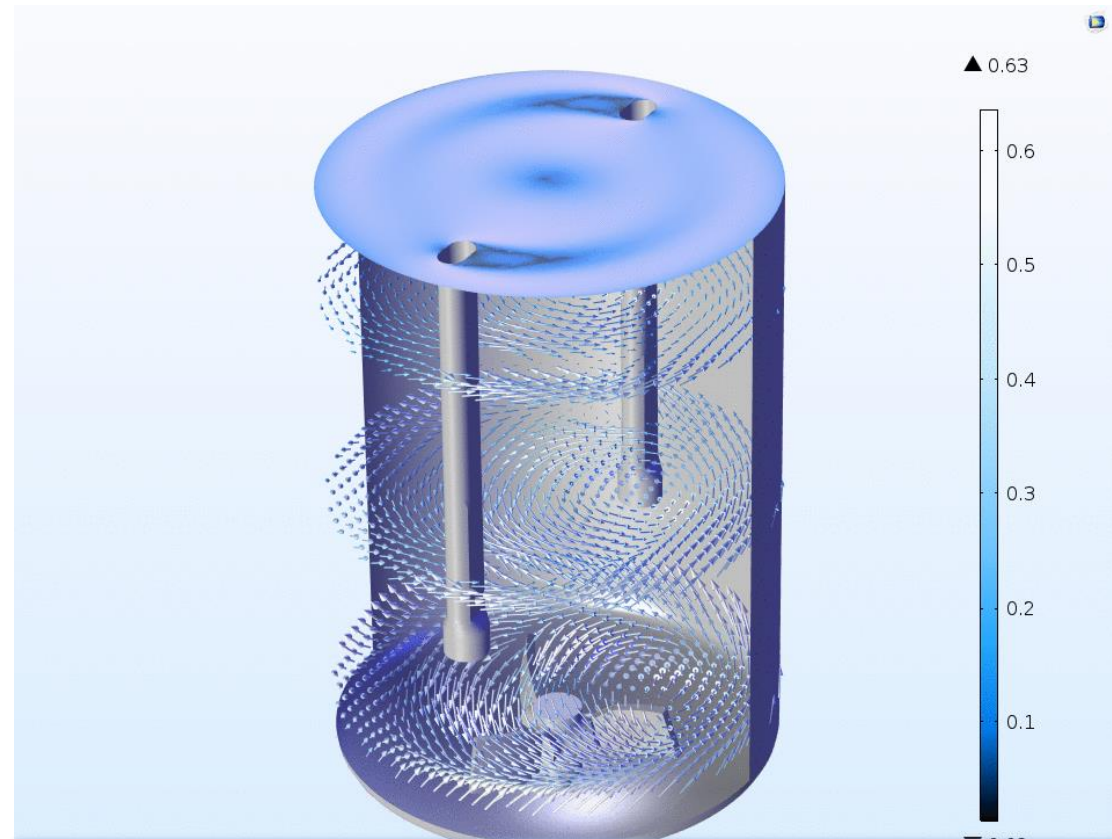
# 旋转机械中的层流与湍流

- 层流
  - 牛顿流体和非牛顿流体
- 湍流
  - 代数  $y^+$  模型
  - L-VEL模型
  - Spalart-Allamaras模型
  - $k-\varepsilon$  湍流模型
  - 可实现的 $k-\varepsilon$  湍流模型
  - $k-\omega$  湍流模型
  - SST湍流模型
  - 低 Re  $k-\varepsilon$  湍流模型
  - $V^2-f$ 模型



# 搅拌器与旋转机械仿真功能

- 旋转域
  - 一个或多个旋转结构
  - 滑动网格方法
- 研究类型
  - 冻结转子
  - 瞬态
- 自由液面特征
  - 瞬态研究的移动自由表面
  - 冻结转子研究的稳态自由表面

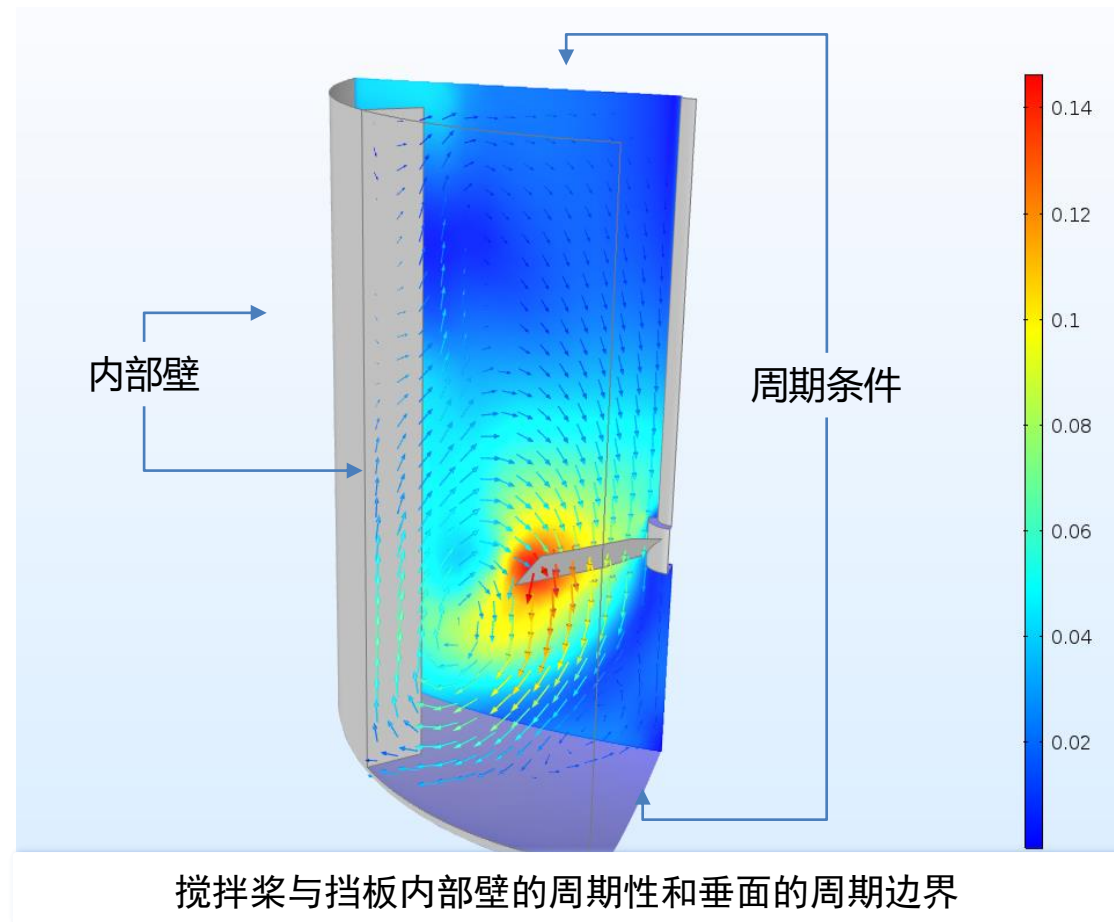


具有底部搅拌桨和两个加热管的搅拌器内自由液面



# 搅拌器与旋转机械仿真功能

- 装配体一致对条件
  - 滑动网格边界连续
- 自动识别旋转壁
- 内部薄壳壁条件描述薄浸入结构
  - 避免狭小区域网格剖分
  - 稳态旋转内部壁
  - 纱窗边界
- 扇区对称周期性条件
  - 避免建模整体结构



# 搅拌机模块零件库

- 零件和零件库
  - 零件：
    - 备用的参数化几何组件，通过输入参数控制输出几何
  - 零件库：
    - 预定义零件的集合
- 搅拌机模块的零件库
  - 11 种桨
    - 轴向桨
    - 径向桨
    - 用于高粘性流体的桨
  - 3 种釜
    - 带挡板或不带挡板

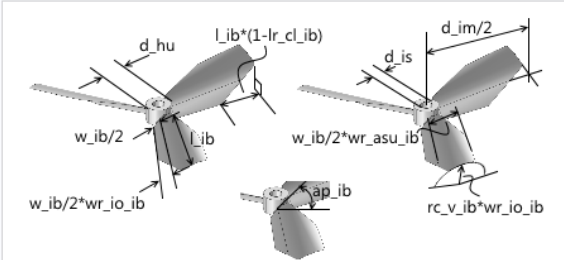
### 零件库

刷新 更新 COMSOL 零件库

搜索

- COMSOL Multiphysics
  - 传热模块
  - 微流体模块
  - 搅拌机模块
    - 叶轮，轴向
      - hydrofoil\_impeller\_constant\_pitch
      - hydrofoil\_impeller**
      - pitched\_blade\_impeller\_bent\_blade
      - pitched\_blade\_impeller\_constant\_pitch
      - pitched\_blade\_impeller
    - 叶轮，高粘流体
      - anchor\_impeller
      - c\_shaped\_outer\_blade\_impeller
    - 叶轮，径向
      - backswept\_impeller
      - backswept\_rushton\_impeller
      - rushton\_impeller
      - smith\_impeller
    - 轴
      - impeller\_shaft
    - 釜
      - cone\_bottom\_tank
      - dished\_bottom\_tank
      - flat\_bottom\_tank
  - 多体动力学模块
  - 射线光学模块
  - RF 模块

### 翼形桨

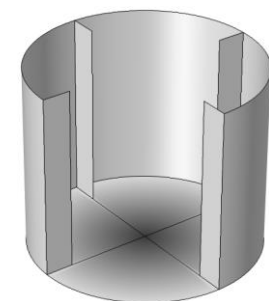
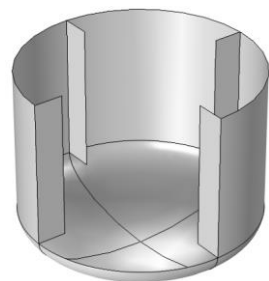
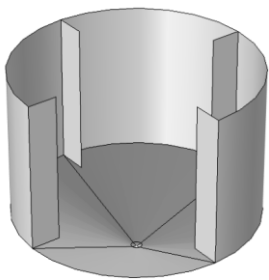


翼形桨几何。

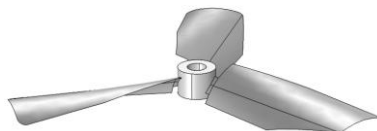
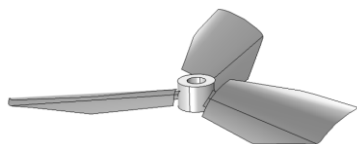
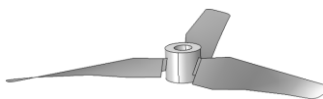
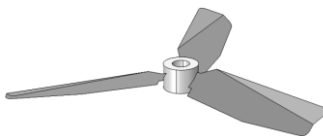
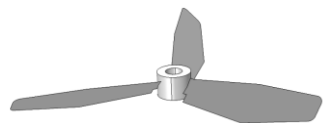
名称	hydrofoil_impeller
模型版本	2
空间维度	3
使用的产品	COMSOL Multiphysics
创建版本	COMSOL 5.3 (Build: 200)
作者	COMSOL
上次修改时间	Mar 23, 2017 5:54:36 PM
创建时间	Mar 23, 2017 5:54:35 PM

搅拌机零件库

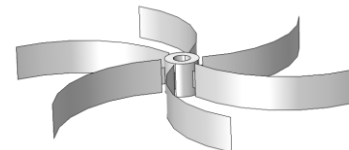
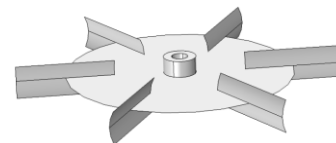
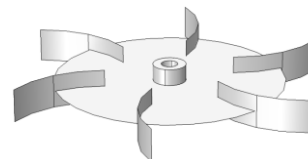
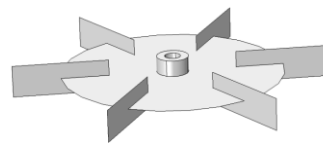
# 搅拌器模块零件库



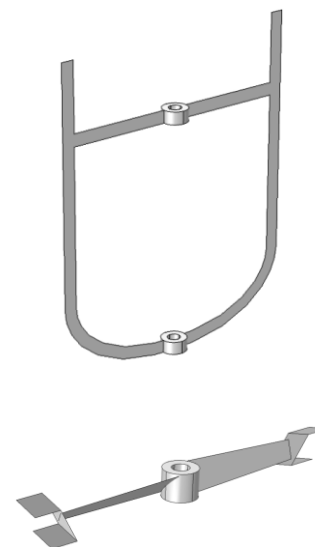
釜



轴向桨



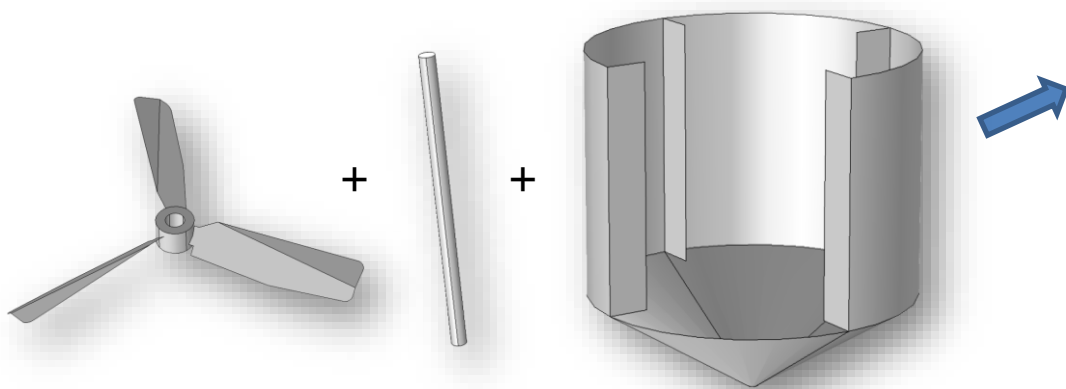
径向桨



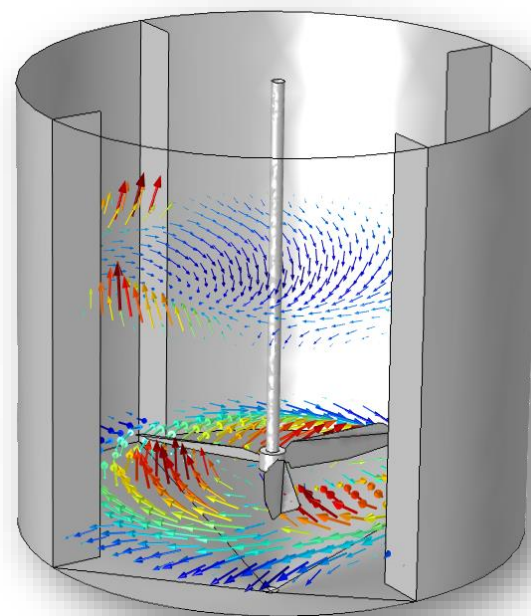
用于高粘性流体的桨

# 使用搅拌器模块的零件

- 方便设定搅拌器的几何结构
- 所有的零件都可以高度定制
  - 参数化几何



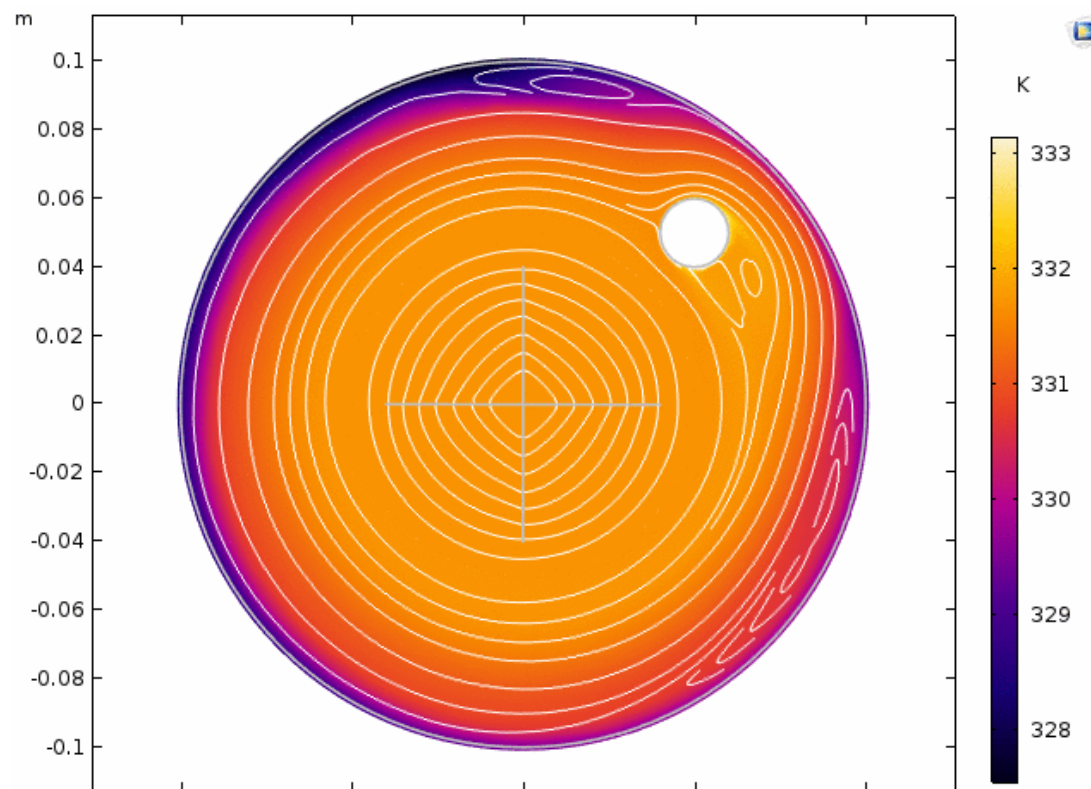
示例：将一个斜叶桨、轴，以及一个锥形底釜结合在一起构成搅拌器。



求解这样一个搅拌器中的流体流动，这里显示的是通过冻结转子法求解得到的流场。

# 旋转机械，非等温流

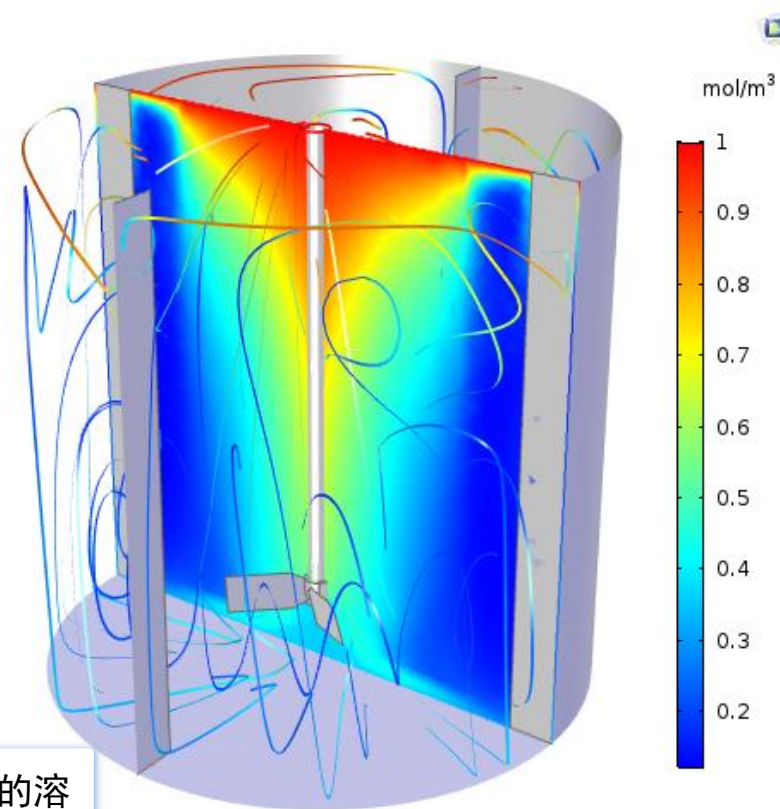
- 层流与湍流
- 可压缩流动  $Ma < 0.3$
- 流体传热与固体传热
  - 固体：静止区域与旋转区域
- 全耦合或单向耦合冻结转子和瞬态研究



实验室级搅拌器的流热仿真分析，浸没在溶液中的物体为热源

# 旋转机械，反应流

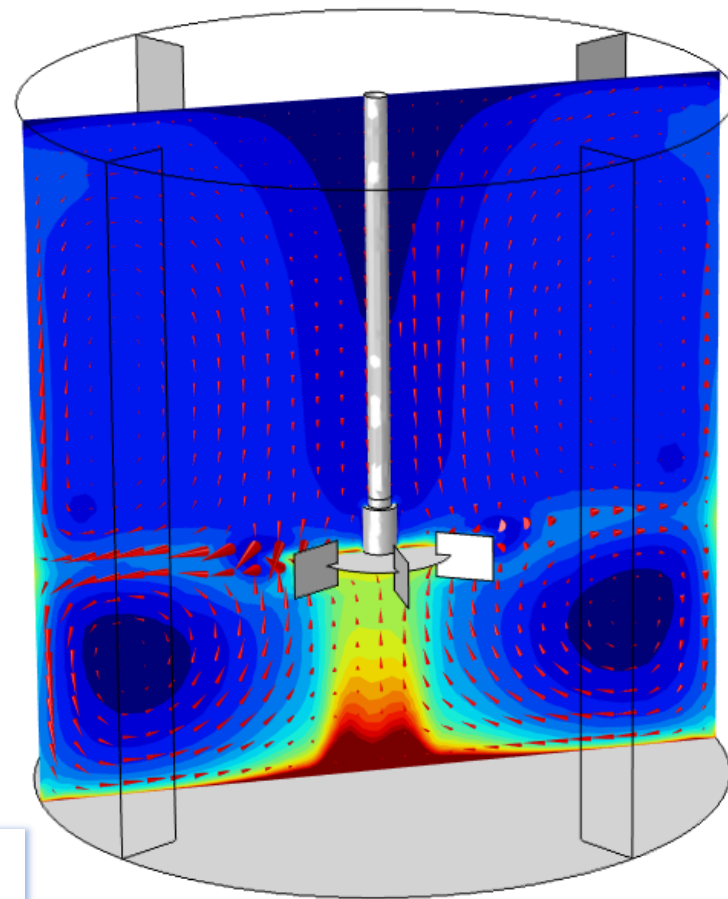
- 旋转机械中的多组分传递与流动
  - 湍流混合与反应模型
  - 组分依赖的流体属性
  - 菲克定律与混合物平均分子扩散公式
  - 考虑Stefan 速度
  - 电场中带电粒子的迁移



转速为515rpm下搅拌2.2s后搅拌器湍流流场中的溶质浓度，其中溶质在自由液面上溶剂

# 旋转机械，多相流

- 混合物和气泡流模型
  - 连续相和分散相
- 固体颗粒、液滴或气泡
- 层流和湍流



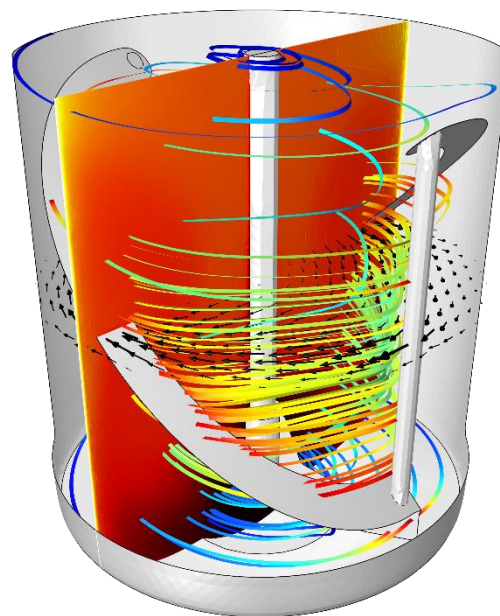
带挡板的搅拌釜在Rushton桨搅拌下的分散相颗粒  
浓度和流速



# 支持的多物理场功能

- 流固耦合（FSI）
  - 需要结构力学模块或 MEMS 模块
- 考虑辐射的共轭传热
  - 包含表面对环境辐射
  - 辐射度方法和参与介质辐射需要传热模块
- 反应工程
  - 包含反应流
  - 表面反应、质量守恒与化学反应方程的动力学需要化学反应工程模块

- 粒子追踪
  - Lagrange-Euler 与两相流的双向耦合
  - 流场和电场中的带电粒子的双向耦合
  - 需要粒子追踪模块



带状螺旋叶片搅拌器中的共轭传热



# 演示案例：二维混合器内的流体混合

- 封闭流场
- 三个入口一个出口
- 使用瞬态求解计算流场内的速度变化
- 定义旋转域和非旋转域
- 几何中采用“形成装配体”
- 采用“一致对”函数实现数据传递
- 流动连续性

