

ANSYS



仿真  
新时代

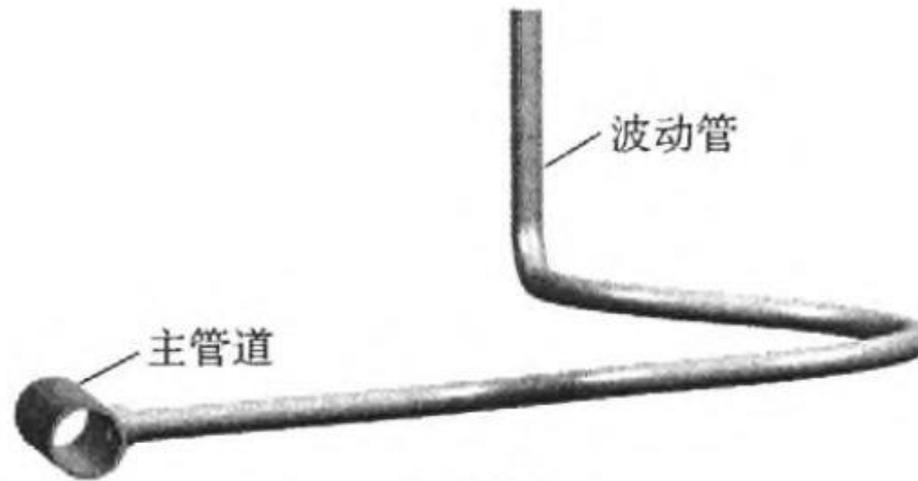
2017 ANSYS用户技术大会

中国·烟台

# 核电厂稳压器波动管热分层分析

## 稳压器波动管

- 在压水堆核电站中，稳压器波动管是稳压器借以维持主系统压力稳定的主要通道。波动管连接稳压器和冷却剂主回路，属于核安全1级、规范1级、抗震1I类、质保QA1级的重要部件。

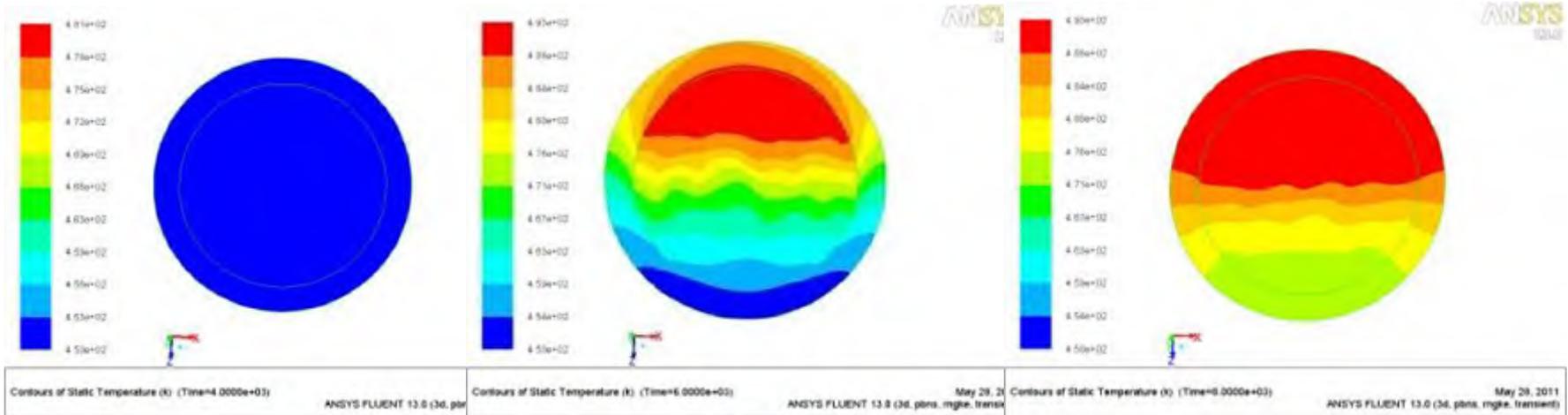


## 波动管热分层

- **波动管热分层源于其水平管段内间歇滞止流、相对热或冷流体泄漏或其他来流的缓慢流动且缺少充分混合。**
- **流体密度随温度变化，在核电站正常或异常工况波动流量较小的情况下，在波动管水平段中来自主回路中的冷却剂由于温度低、密度大，会占据波动管横截面的下部区域；而来自稳压器的流体由于温度高、密度小，会浮于波动管横截面的上半部分。这种现象就是热分层现象。**

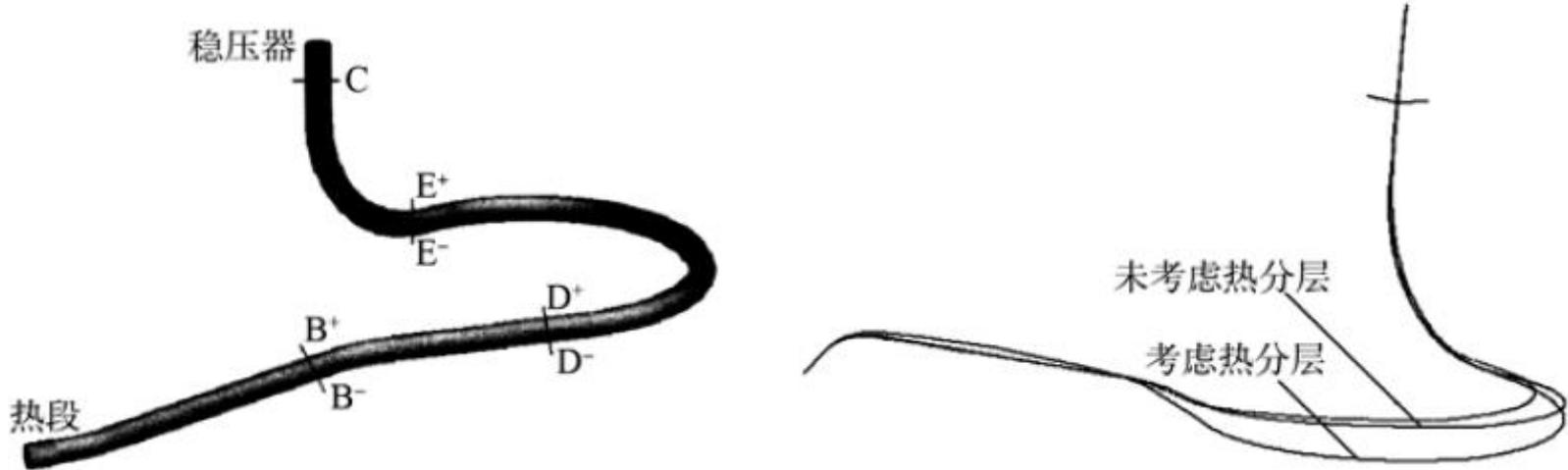
# 波动管热分层

- 出现波动管热分层的三个主要条件是：波动管有（准）水平段；稳压器与主管道中的冷却剂存在较大温差；波动流量较低。
- 热分层现象主要出现于反应堆启堆和停堆过程中。



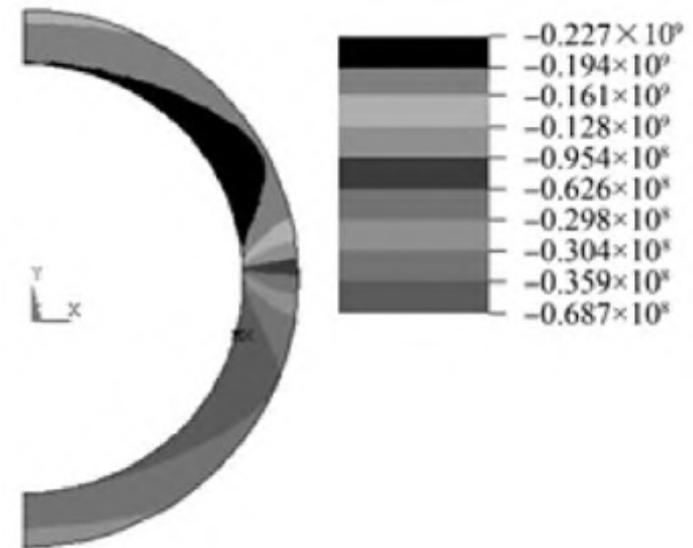
## 热分层的影响

- 波动管热分层是由于水平段的流体缺少充分混合而产生的，会使得水平管段管壁上下部产生较大的温差，从而导致波动管上下部膨胀程度不一致，波动管出现较大非预期位移。



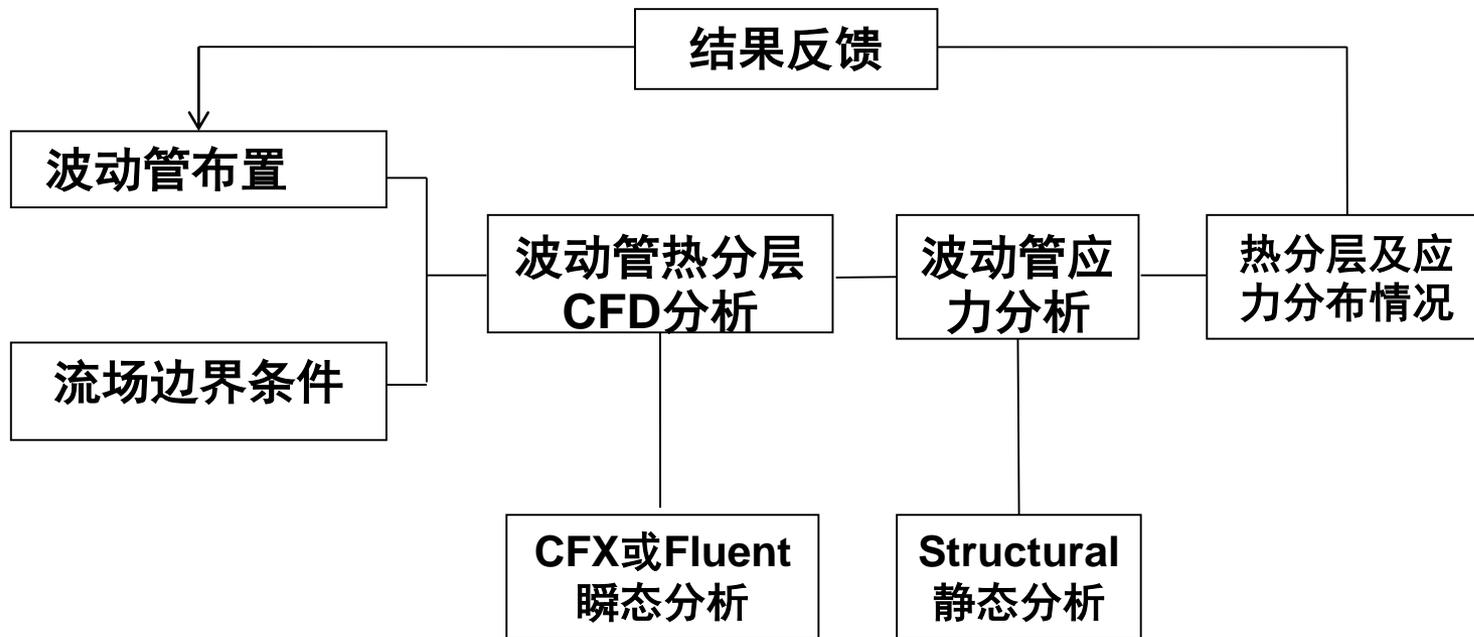
## 热分层的影响

- 热分层导致的这种变形不协调会导致波动管中出现总体弯曲应力、局部热应力和非预期的大位移及支承反力。
- 另外流体的流动会导致波动管内分层界面产生类似于表面波的震荡现象，即热纹震荡（thermal striping）。
- 这种震荡会对管壁产生周期性的局部热瞬态，可能会使得波动管产生局部的热疲劳。



# 热分层的分析流程

- 设计阶段使用ANSYS对波动管热分层分析的流程图



# 热分层分析的理论背景

- 波动管内热分层流动实际上是考虑了浮力项的湍流流动；
- 考虑瞬态不可压缩流的Reynolds时均方程：

连续方程：

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho U_j) = 0,$$

动量方程：

$$\frac{\partial (\rho U_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho U_j U_i) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \mu_i \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \overline{\rho u_i u_j} \right) + \rho g_i,$$

焓方程：

$$\frac{\partial (\rho h)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho U_j h)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{\lambda}{c_p} \frac{\partial h}{\partial x_j} - \rho c_p \overline{u_j \phi} \right) + \frac{\partial p}{\partial t} + S_h$$

- 其中 $\overline{u_i u_j}$ 为Reynolds应力； $\overline{u_j \phi}$ 为湍流通量；通过模化或者直接求解这两项可以建立不同的湍流模型。

# 热分层分析的理论背景

## • k-ε 湍流模型

$$\overline{u_i u_j} = -\nu_t \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) + \frac{2}{3} \delta_{ij} k \quad \overline{u_i \phi} = \frac{\mu_t}{\rho \sigma_h} \frac{\partial T}{\partial x_i}$$

湍动能  $k$  和湍动能耗散  $\varepsilon$  的输运方程:

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho U_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = P_k + G_k - \rho \varepsilon + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu_t + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right]$$

$$\rho \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \rho \cdot U_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = c_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (P_k + G_k) (1 + c_{3\varepsilon} R_f) - c_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu_t + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right]$$

$$P_k = \mu_{eff} \left[ \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \right]: \text{湍能产生项}$$

$$\text{湍动能 } k = \frac{1}{2} \overline{u_i u_i}; \quad \text{湍动能耗散 } \varepsilon = \nu_t \overline{\frac{\partial u_i}{\partial x_j} \frac{\partial u_i}{\partial x_j}}$$

$$G_k = -\rho \beta g_i \overline{u_i \phi} = -\frac{\mu_t}{\rho \sigma_h} \frac{\partial \rho}{\partial T} \left( \frac{\partial T}{\partial x_i} g_i \right): \text{热浮力项}$$

## Realizable $\kappa$ - $\epsilon$ 湍流模型

- 在Realizable  $\kappa$ - $\epsilon$ 湍流模型中湍动能 $\kappa$ 的输运方程在形式上与标准 $\kappa$ - $\epsilon$ 湍流模型中湍动能 $\kappa$ 的表达形式相同，但不再是常数。

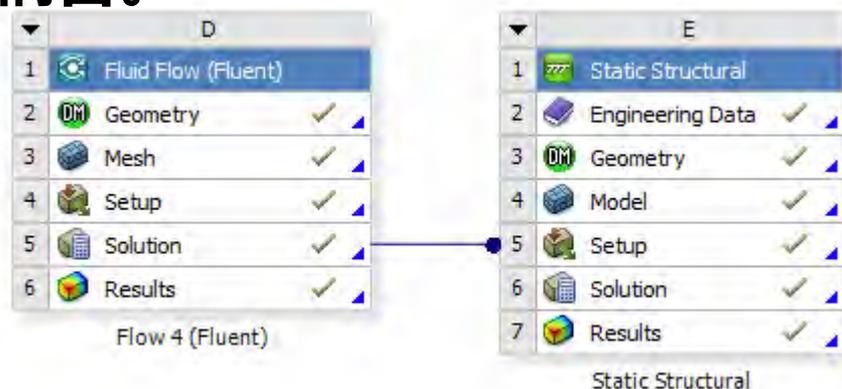
$$\rho \frac{\partial \kappa}{\partial t} + \rho U_j \frac{\partial \kappa}{\partial x_j} = P_\kappa + G_\kappa - \rho \epsilon + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu_l + \frac{\mu_t}{\sigma_\kappa} \right) \frac{\partial \kappa}{\partial x_j} \right]$$

- 在Realizable  $\kappa$ - $\epsilon$ 湍流模型中，对湍动能耗散率额外考虑了涡量脉动的影响，在形式上与标准 $\kappa$ - $\epsilon$ 湍流模型的湍动能耗散率输运方程有较大区别。

$$\rho \frac{\partial \epsilon}{\partial t} + \rho \cdot U_j \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} = \rho c_{1\epsilon} S \epsilon + c_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{\kappa} c_{3\epsilon} G_\kappa - c_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{\kappa + \sqrt{\nu \epsilon}} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu_l + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right]$$

## 热分层的ANSYS分析

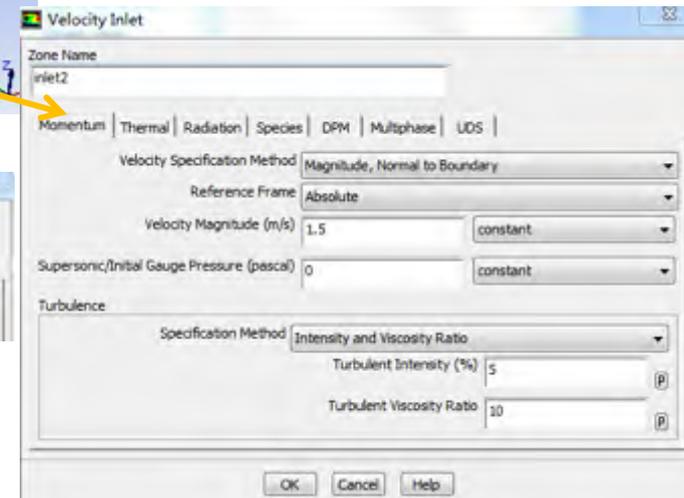
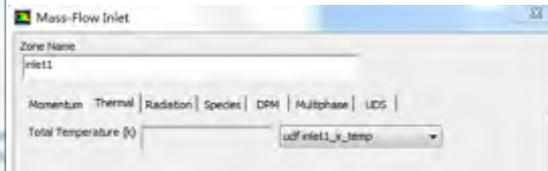
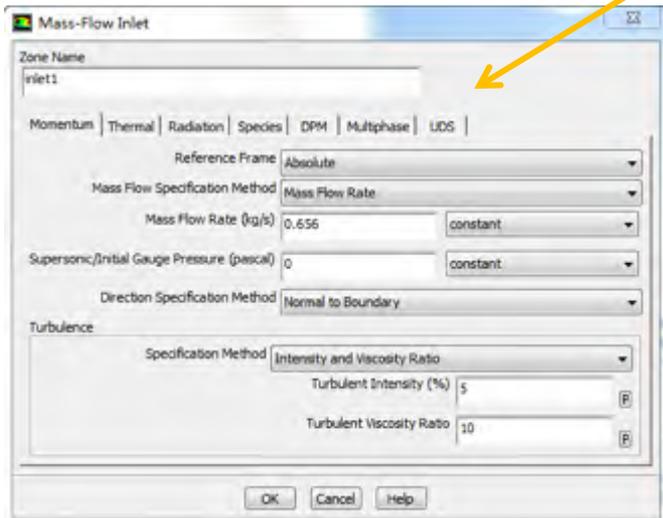
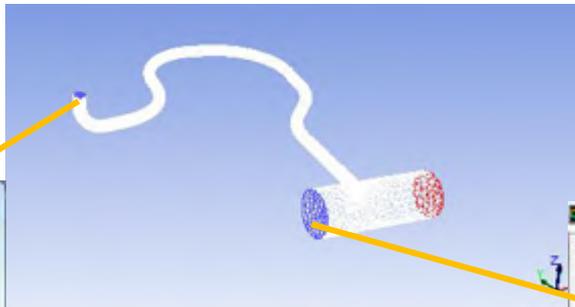
- 采用ANSYS Workbench中的Fluent模块和Static Structural模块进行单向耦合。



- 由于波动流体的温度随时间变化，密度随温度变化，采用UDF接口来输入物性参数。

# 热分层的边界条件

- ①波动管入口流体边界：入口流速；入口流体温度；
- ②主管道入口流体边界：入口流速、入口流体温度；
- ③主管道出口流体边界：出口压强。

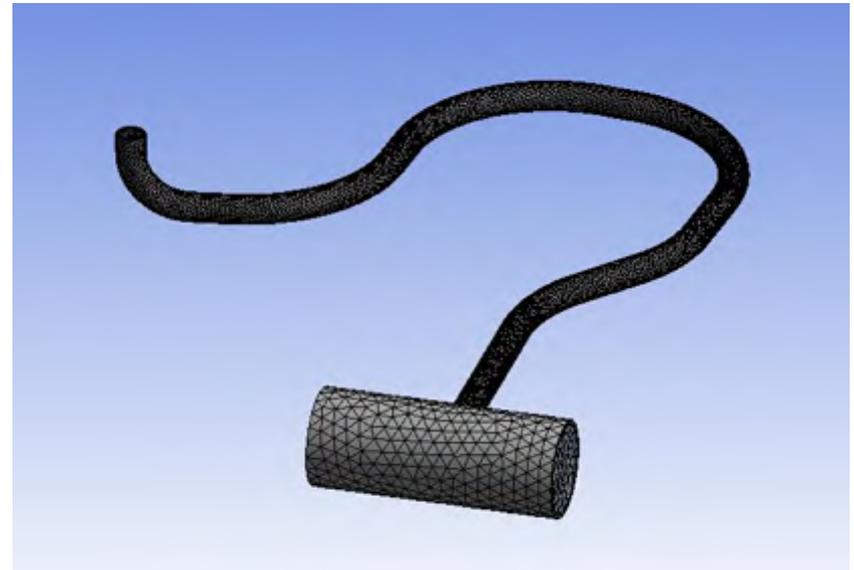
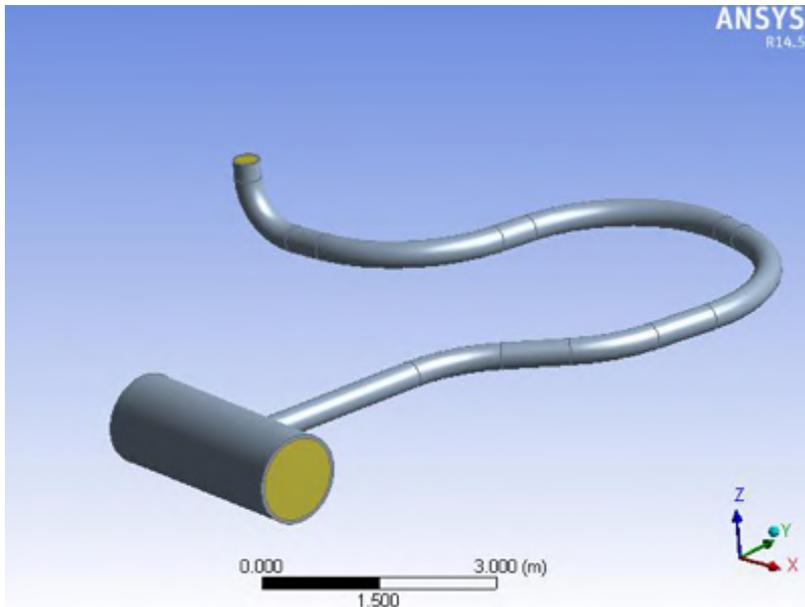


# 热分层分析算例

- **算例一：波动管(布置方式1)在启堆过程中的热分层现象。**
- 机组启动阶段：机组从冷停堆（70°C以下，1atm）到热备用（avg291.4°C，15.5atm），主要分为如下几个阶段：
  - 70°C以下，1atm 到 70°C以下，2.6MPa（RCP系统动态及静态排气）
  - 70°C以下，2.6MPa 到 120°C，2.6MPa（一回路和稳压器温度相同，升温速率28K/h）
  - **120°C，2.6MPa 到 226°C，2.6MPa（一回路温度维持不变，稳压器升温速率56K/h，波动流量为0.656kg/s）**
  - 稳压器刚形成汽空间到稳压器水位为17.6%（一回路温度维持120°C不变，稳压器侧流体温度不变，波动流量为6.56kg/s）
  - 稳压器水位17.6%，226 °C，2.6MPa，一回路120°C，2.6MPa 到 热备用一回路291.4°C，15.5MPa，稳压器侧345 °C，15.5MPa
- **稳压器端入口流速：0.656kg/s，稳压器侧温度由393K升温至501K（升温速率为56K/h）。**

# 热分层分析算例

- 模型

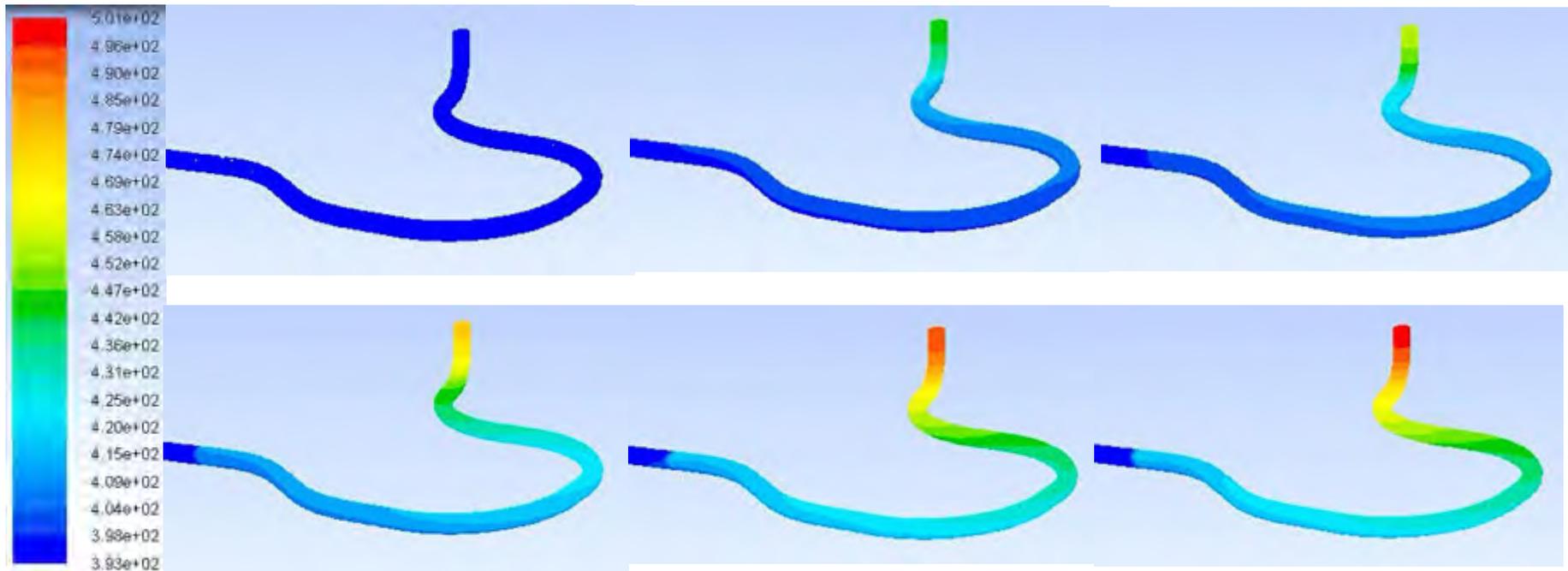


## 热分层分析算例

- 总体设置：瞬态、重力加速度；
- 模型设置：能量方程、Realizable  $\kappa$ - $\epsilon$ 湍流模型、标准壁面函数；
- 材料参数：UDF导入随时间变化温度及密度；
- 求解算法：PISO算法
- 边界条件：
  - 波动流量：0.656kg/s，温度由393K升至500K，56K/h
  - 主管道流速：0.15m/s及6m/s两种情况，393K
  - 出口：参考压强，393K

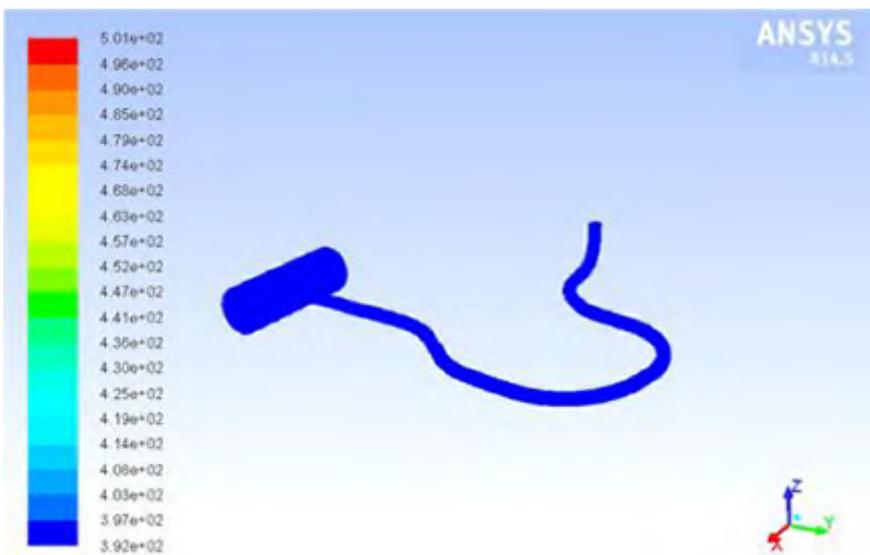
# 热分层分析算例

- 计算结果

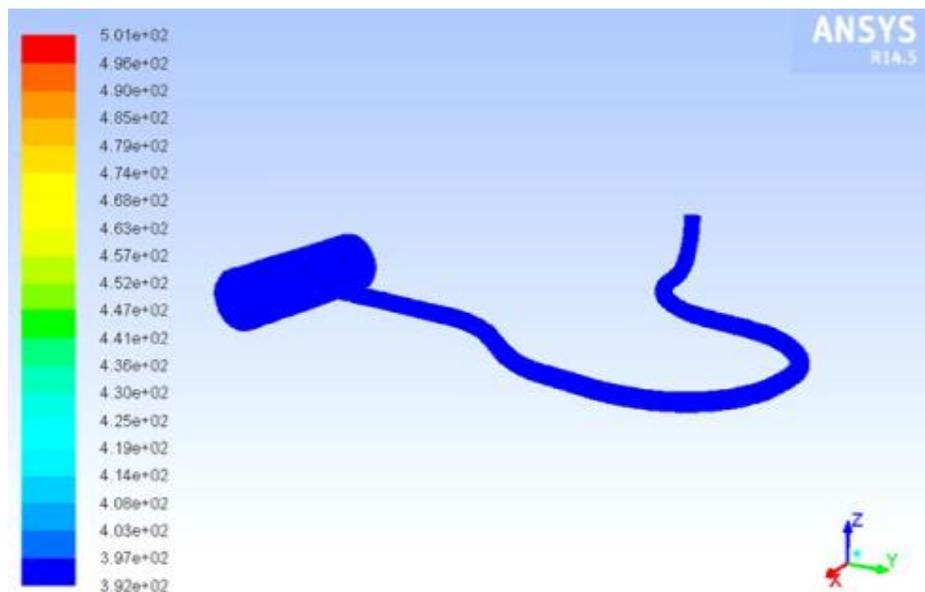


# 热分层分析算例

## • 计算结果



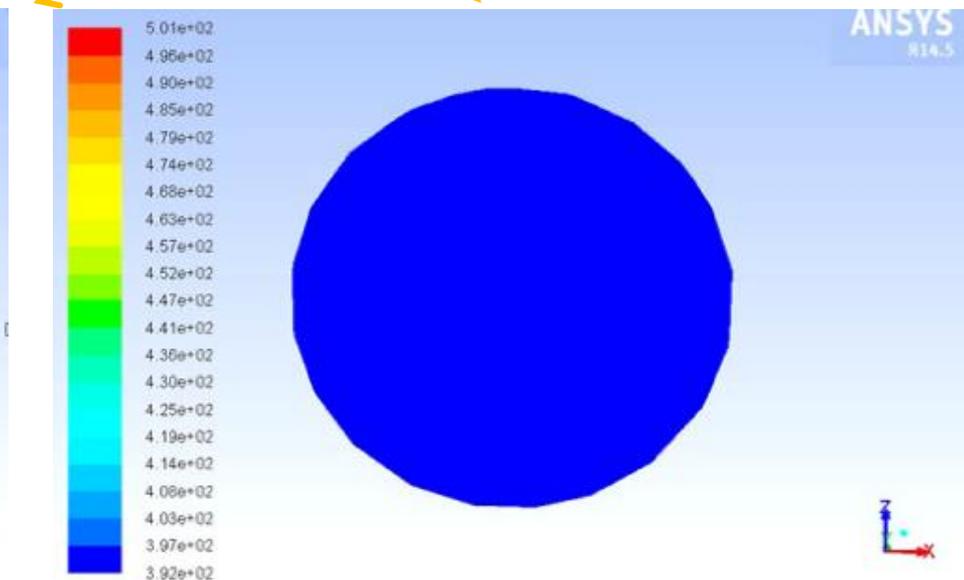
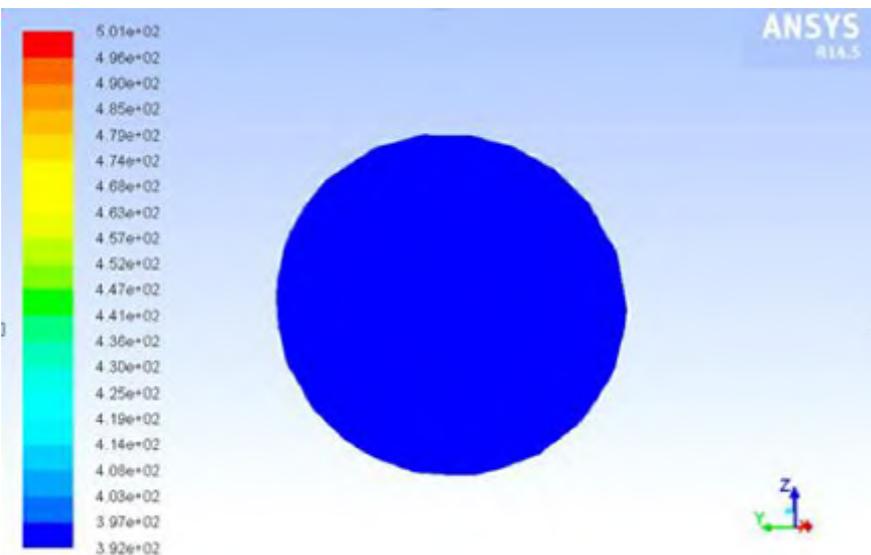
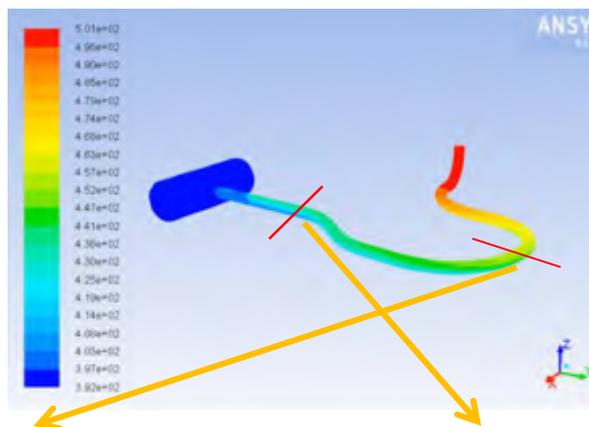
inlet2流速1——0.15m/s , 393K



inlet2流速2——6.0m/s , 393K

# 热分层分析算例

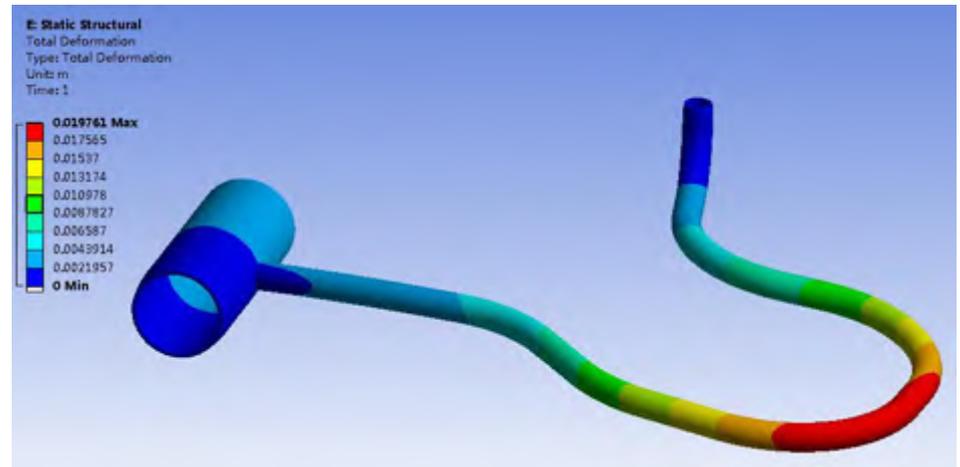
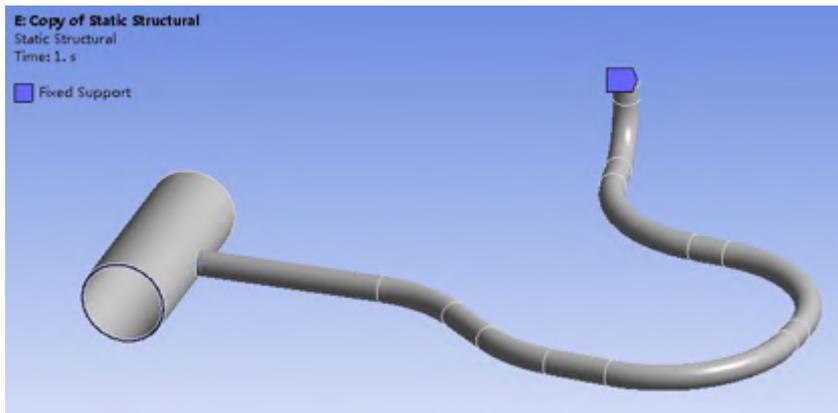
- 计算结果



inlet2流速2——6.0m/s， 393K

# 热分层分析算例

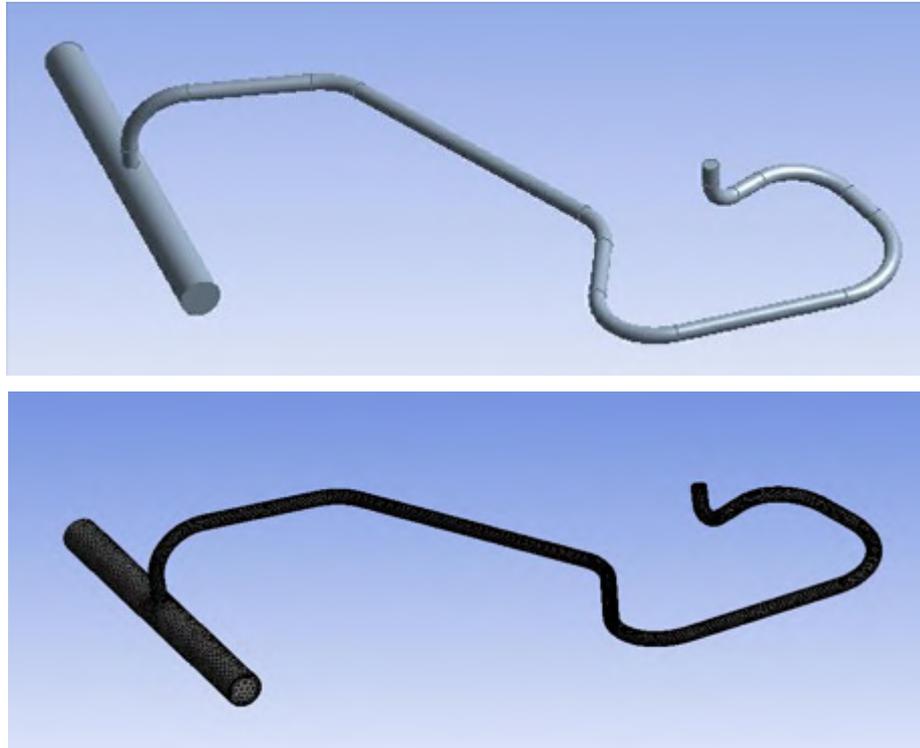
- 计算结果



inlet2流速1——6.0m/s , 393K

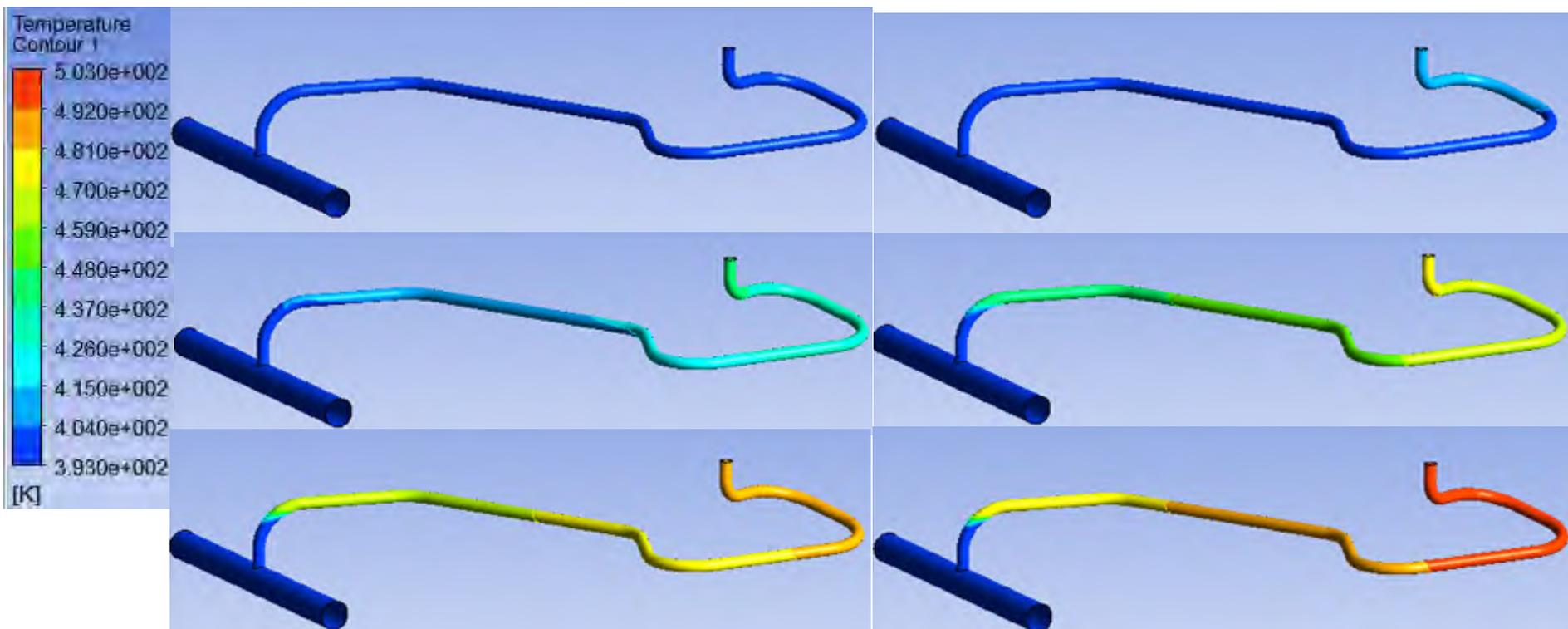
## 热分层分析算例

- 算例二：波动管（布置方式2）在算例一条件下的热分层现象。
- 模型



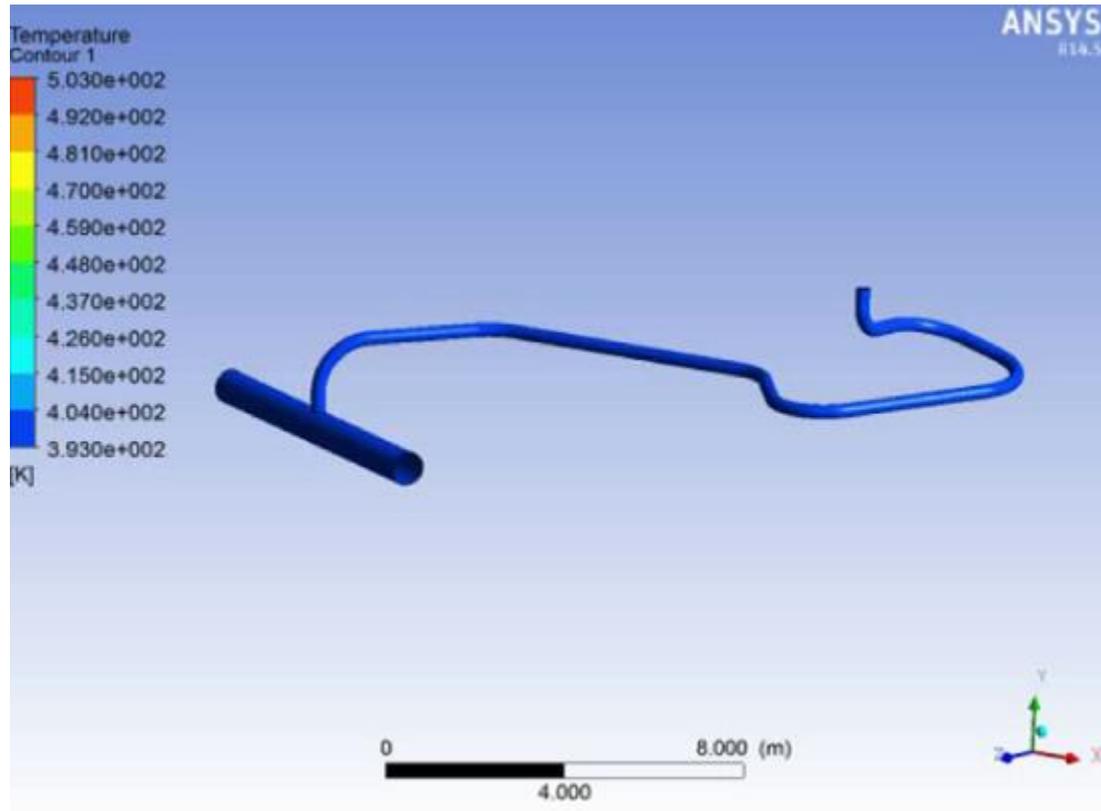
# 热分层分析算例

- 计算结果



# 热分层分析算例

- 计算结果



ANSYS



仿真  
新时代

2017 ANSYS用户技术大会

中国·烟台

感谢聆听



ANSYS-China