

ICSC 2019

Core Competence Enhanced by MBD



IDAJ CAE Solution Conference

CONVERGE流固耦合传热专题介绍

IDAJ中国
技术部 叶良春

提纲

- ◆ 背景
- ◆ 三种CHT方法
- ◆ 三维直接耦合CHT方法介绍及案例演示
- ◆ 其它相关专题介绍
- ◆ 一维CHT介绍
- ◆ 附录

背景

- ◆ 发动机结构设计中，应力引起的疲劳失效通常是关注的重点。
- ◆ 最主要最复杂的应力来自于温度时间和空间不均匀引起的热应力。
- ◆ 热应力的准确预测依赖于固体温度场的准确预测
- ◆ 此外，固壁温度边界的可靠设置也有助于缸内燃烧分析精度。
- ◆ CONVERGE提供了多种方法来可靠预测固体部件温度场。

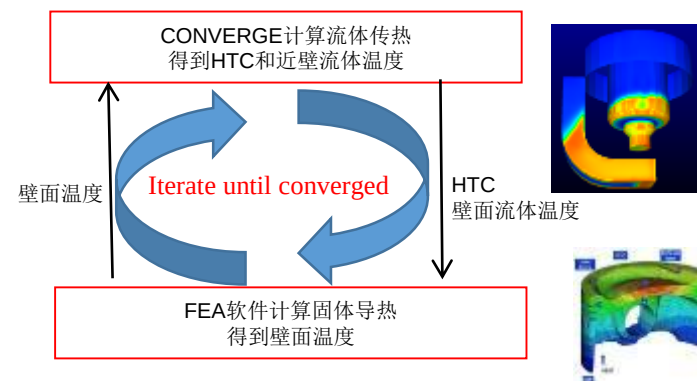
三种流固耦合传热(CHT)方法(1/4)

• 1、间接耦合法（传统方法）

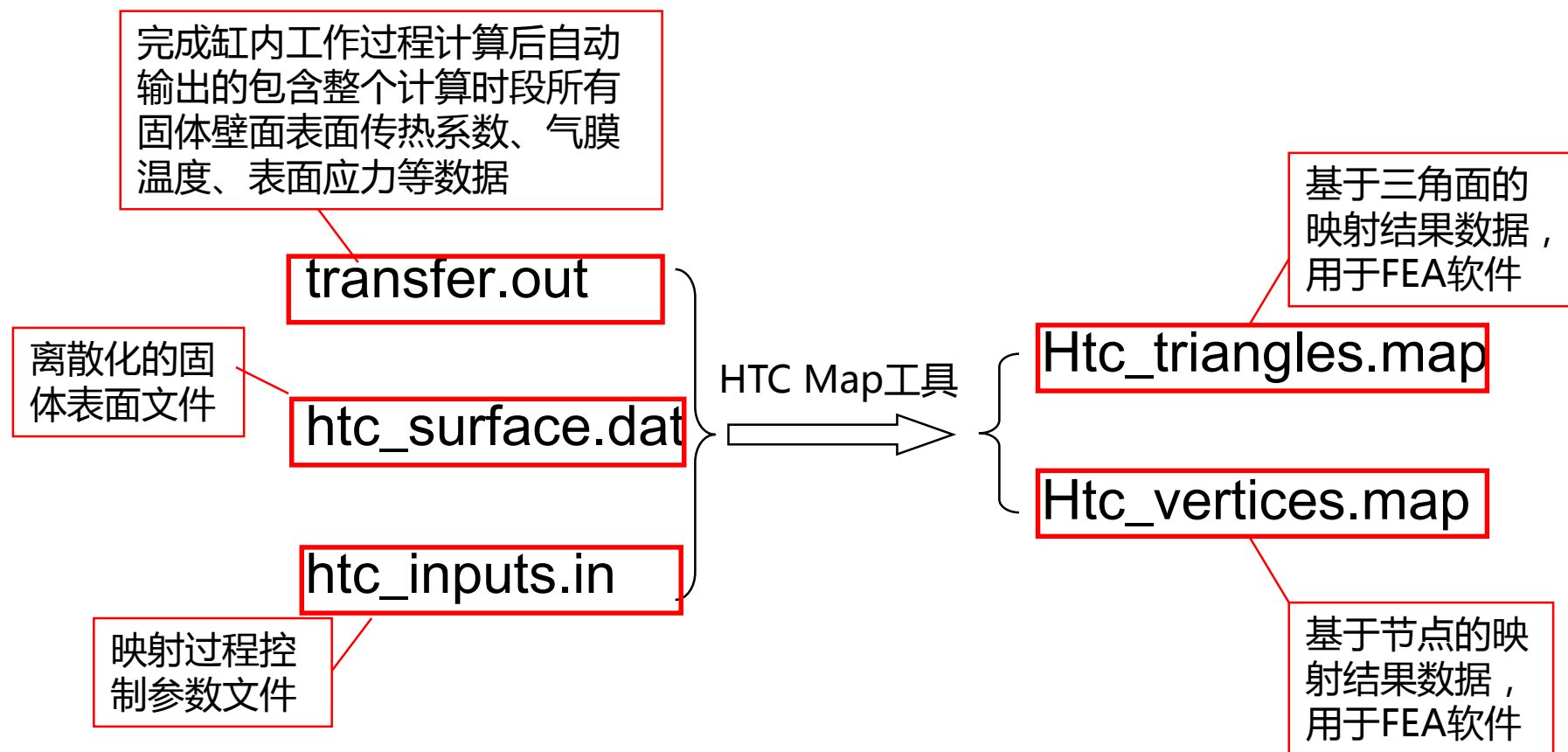
- 基于给定的壁面温度边界条件用CONVERGE进行流体传热计算CONVERGE输出壁面HTC和近壁流体温度给结构软件(如Abaqus)进行导热计算
- 导热计算完成后，输出新的壁面温度给CONVERGE进行流体传热计算
- 重复以上两步直至固体温度收敛

■ 缺陷：

- 流固交界面需要数据映射插值，降低精度
- 需要工程师熟悉两个软件操作，
- 需要多次反复迭代耦合，过程繁琐，耗时长



三种流固耦合传热(CTH)方法(2/4)



- 详细步骤请参考IDAJ技术文档《CONVERGE壁面HTC映射FEA模型方法》

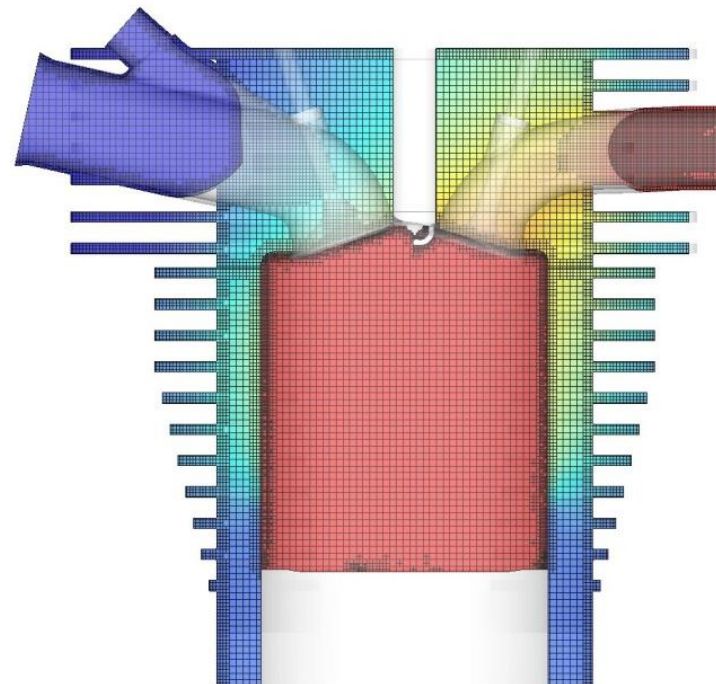
三种流固耦合传热(CHT)方法(3/4)

• 2、三维直接耦合法（3DCHT）

- 从CONVERGE 2.1开始用户就可以在CONVERGE内实现三维直接共轭传热计算
- 在同一模型内包含流体域和固体域，通过interface实现直接耦合传热计算
- 同时引入超循环（super-cycling）技术很好地处理固体传热和流体流动时间尺度不同的问题，大大缩短计算时间

■ 优势：

- 直接耦合，无需映射转换，精度高
- 只涉及一个软件操作
- 一次计算固体温度达到收敛，无需反复迭代耦合



三种流固耦合传热(CHT)方法(4/4)

• 3、一维简易导热法（1DCHT）

- 在边界条件定义中，对壁面边界可以启用1DCHT来计算固体温度，
- 无需划分实体网格，仅考虑沿壁面法线方向导热
- 可模拟多层固体和层间接触热阻

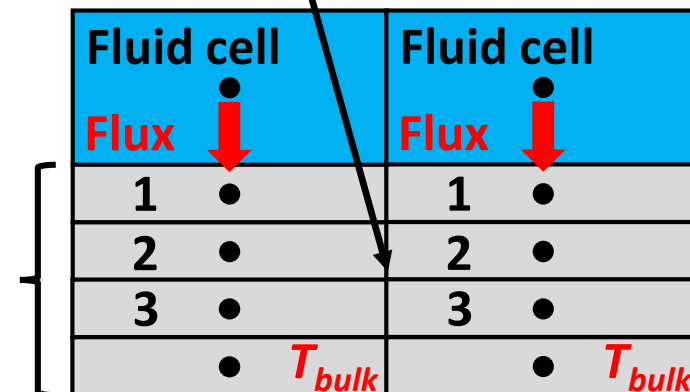
■ 优势：

- 设置简单，无需附加建模工作
- 计算速度快

■ 局限

- 仅适用于固体薄层（如绝热涂层）
- 或热穿透不深(隔热材料)的情形

不考虑与壁面平行
方向的导热

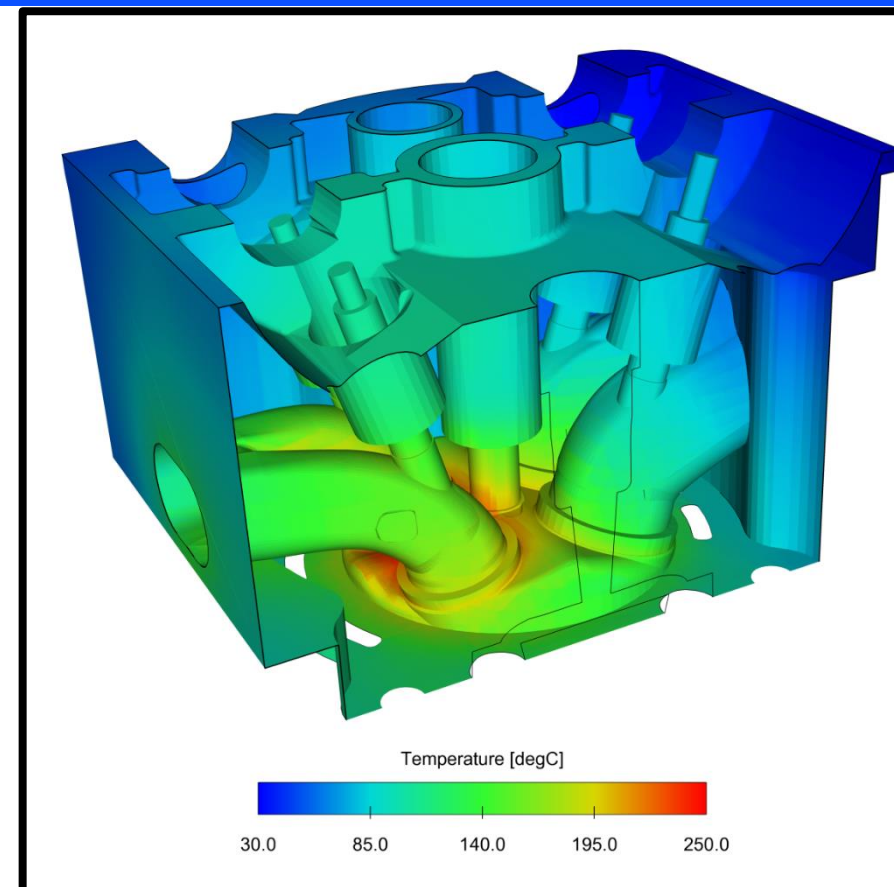


提纲

- ◆ 背景
- ◆ 三种CHT方法
- ◆ 三维直接耦合CHT方法介绍及案例演示
- ◆ 其它相关专题介绍
- ◆ 一维CHT介绍
- ◆ 附录

3DCHT应用场景

- 3DCHT可用于以下传热过程研究：
 - 从机体往冷却液的传热
 - 缸内燃烧对机体的加热
 - 机体的强制对流冷却
- 3DCHT可以预测金属的热点(hot spot),这些热点可能引起爆震



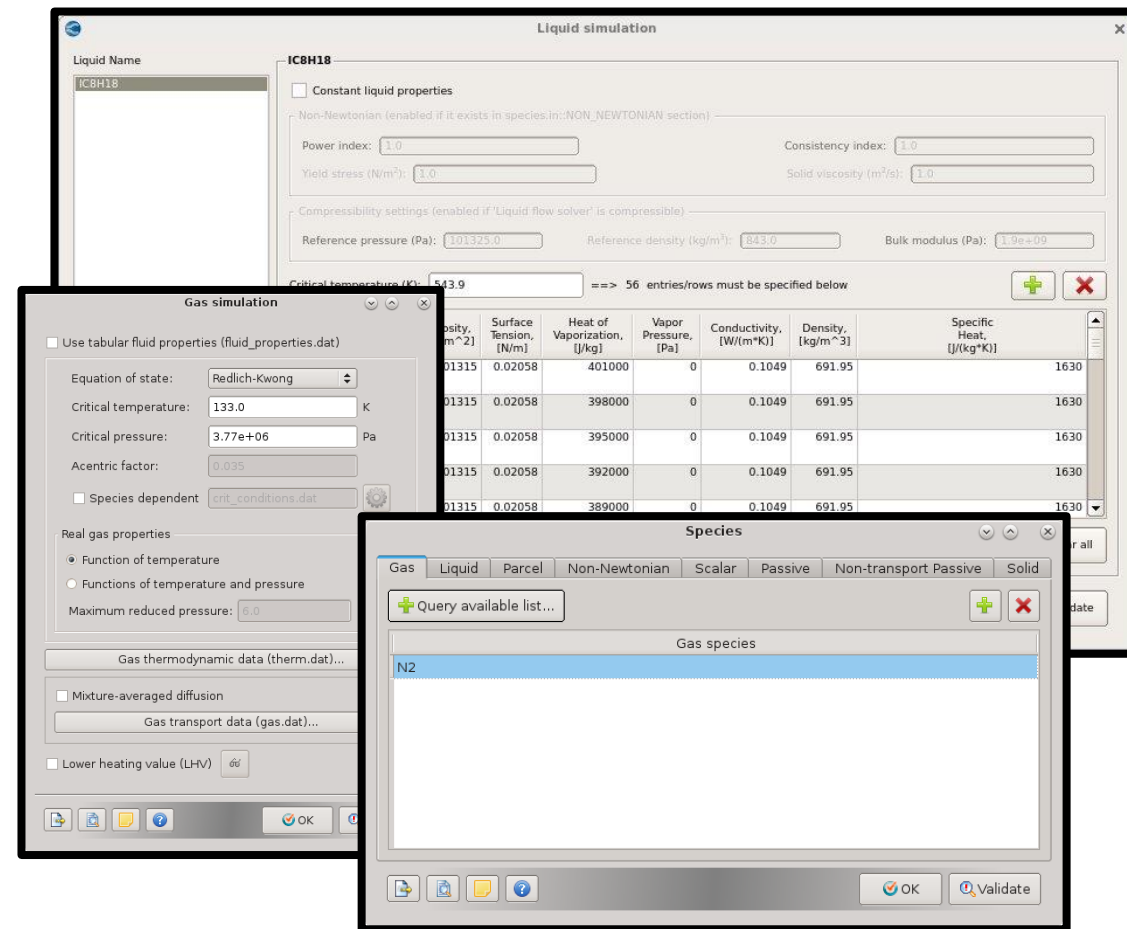
Gasoline engine head

3DCHT 模型设置

- 3DCHT分析模型设置包括以下步骤
 - 定义流体和固体材料及其属性
 - 设置流体和固体region
 - 对region分配流体或固体stream
 - 设置流固交界面边界条件
 - 设置求解器(transient, steady-state, 或 super-cycle)
 - 进行后处理设置

Fluid Setup (1/2)

- 对于一个3DCHT模型，可以设置为以下某种方案：
 - 固体+气体: 在*Case Setup > Materials > Gas simulation* 中定义气体属性
 - 可以同时包含Lagrangian liquid or film parcels计算
 - 固体+液体: 在*Case Setup > Materials > Liquid simulation* 中定义液体属性
 - 固体+VOF: 选择*Case Setup > Physical Models > Volume of Fluid (VOF) modeling*
- 然后在*Case Setup > Materials > Species* 中设置液体或气体组分

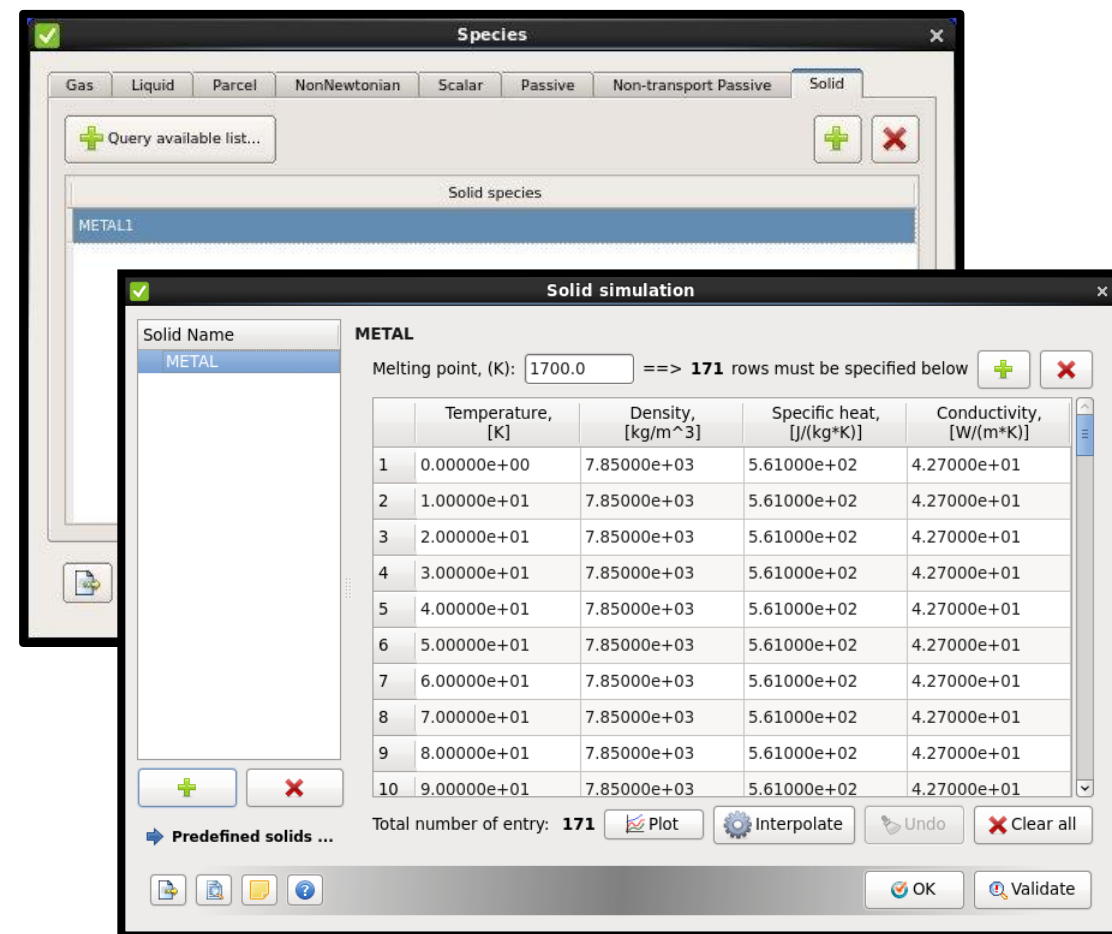


Fluid Setup (2/2)

- CONVERGE目前不支持在同一个模型中同时包含气体、液体和固体三种材料
- 对于水冷发动机传热计算，需要通过两个模型来实现：
 - 先进行固体+气体模型计算，再进行液体域模型计算
 - 先进行固体+流体模型计算，在进行气体域模型计算

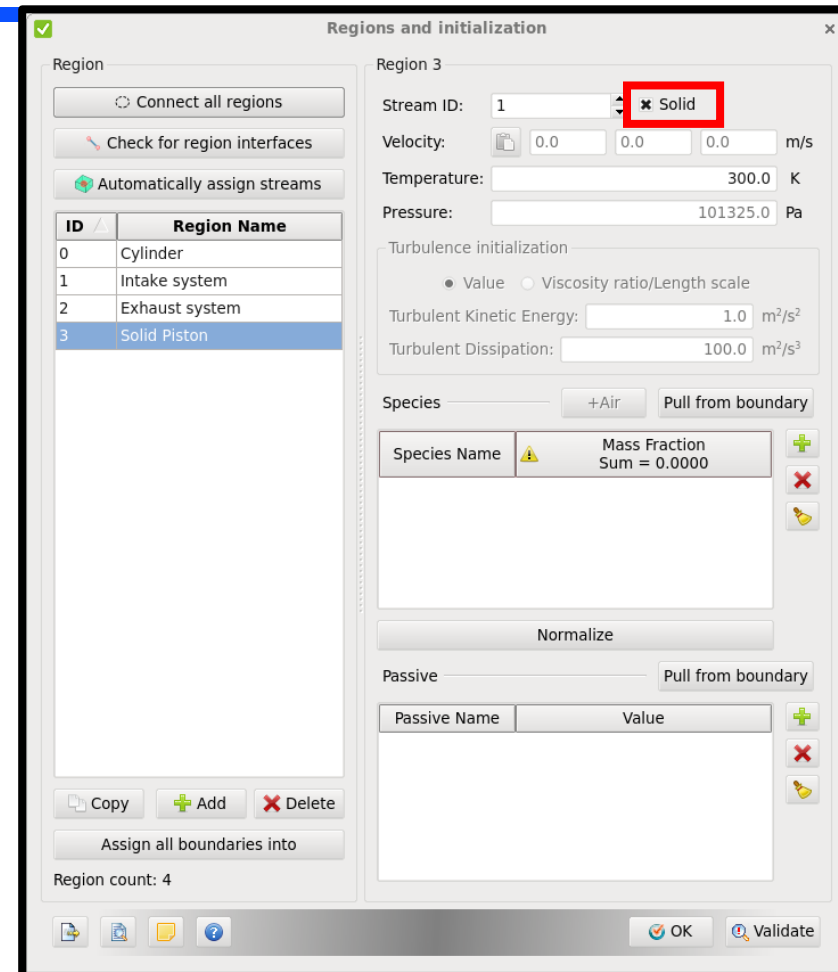
Solid Setup

- 在 *Case Setup > Materials > Solid simulation* 定义随温度变化的属性(C_p , ρ , k)
 - CONVERGE 自带固体数据库
- 在 *Case Setup > Materials > Species* 中定义一种或多种固体组分



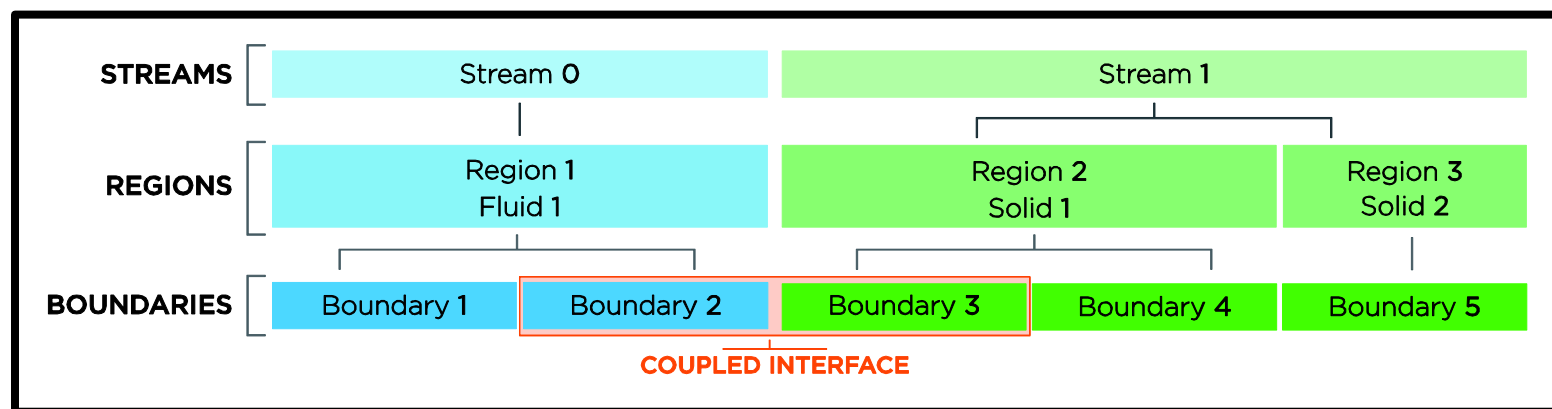
Fluid and Solid Regions

- 在 *Case Setup > Initial Conditions > Regions and Initialization* 中设置流体 *region* 和固体 *region*。
 - 勾选 Solid 将某个 *region* 标记为固体域
 - 如果不勾选，则默认为流体域



Streams (1/3)

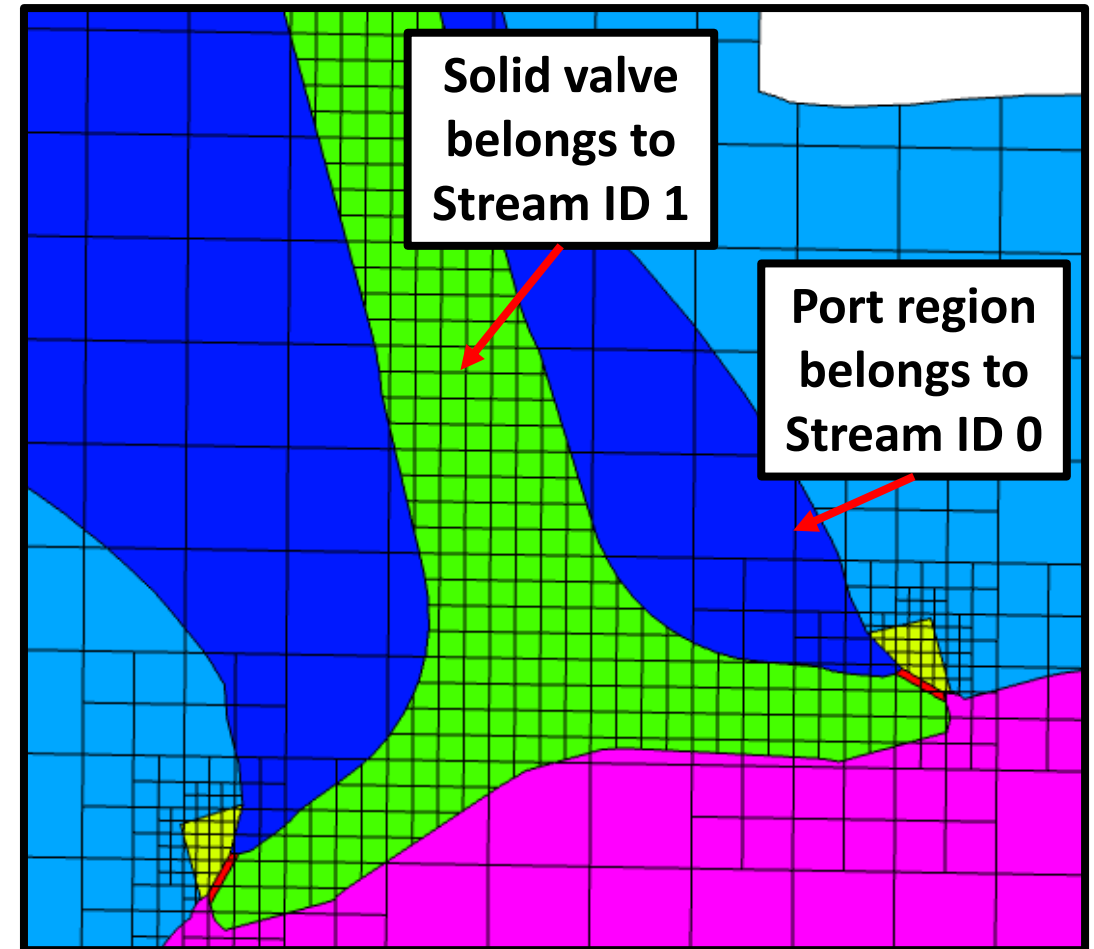
- Stream是指具有相同的相（流体、固体等）的多个region的集合。
- 对每个region都需要指定所属stream
- 一般情况下CONVERGE对不同的stream独立进行计算。流固耦合交界面是一个特例，此处温度和热流是连续的。



CONVERGE 中 stream, region, and boundary层级关系

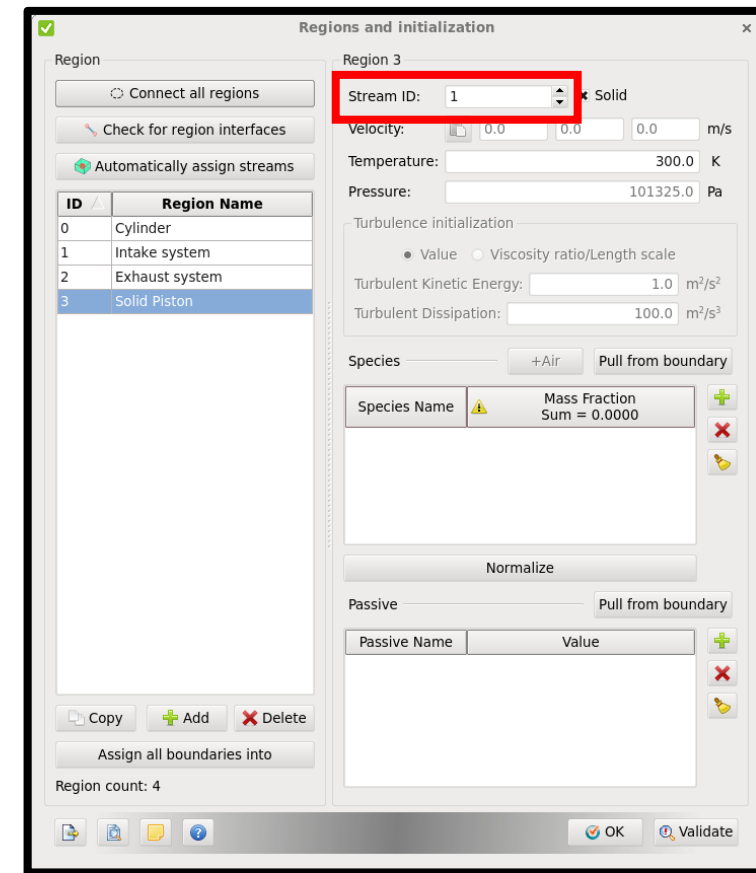
Streams (2/3)

- CONVERGE对每个stream单独生成网格
 - 因此interface两侧可以使用不同的embedding加密级数



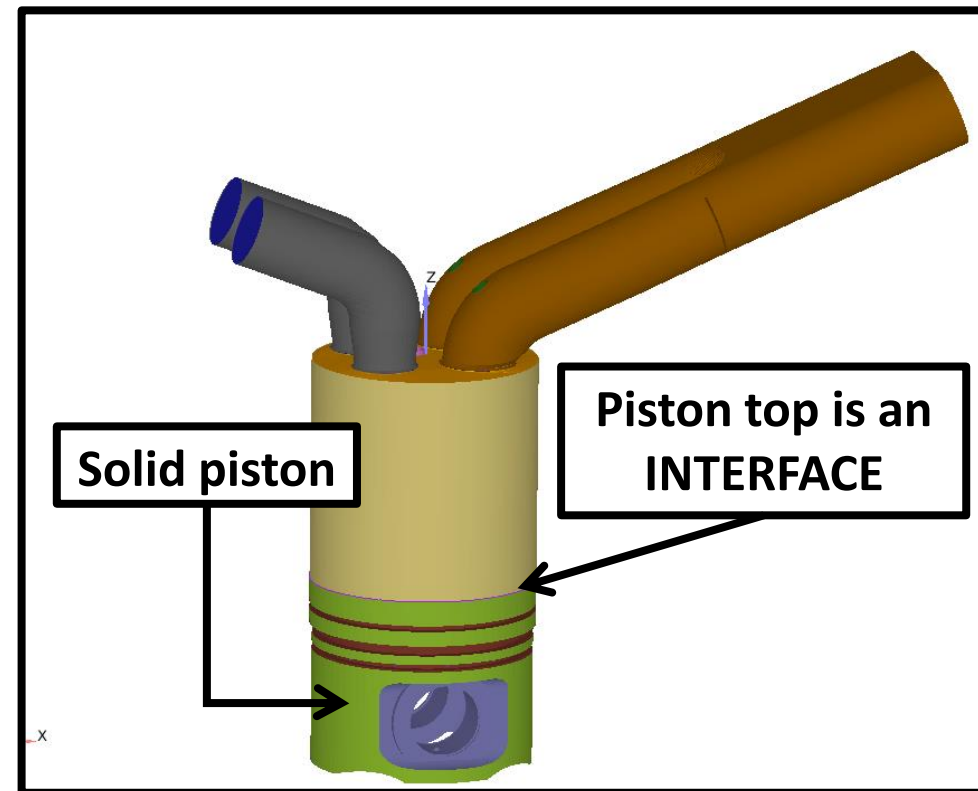
Streams (3/3)

- 通过 *Case Setup > Initial Conditions and Events > Regions and initialization* 面板中的 Stream ID 来指定不同的 stream。我们推荐如下方案：
 - Stream ID = 0 for fluids
 - Stream ID = 1 for static solids
 - Stream ID > 1 for moving solids
- 将每个运动固体域设置为一个单独的 stream
 - 如果两个固体域拥有相同的运动规律，则将它们设为同一个 stream
 - 但是，如果这两个固体共享一个 interface，则需要将它们设为不同的 stream



Solid Piston CHT案例演示

- 本案例演示如下操作
 - 定义固体材料及其属性
 - 设置固体region
 - 为各个region分配stream id
- 本案例以自带的“Tumble_GDI_SAGE”四冲程直喷汽油机为基础，将其改为预混燃烧，并计算活塞固体传热
- 我们会删除原来的piston表面，然后导入一个固体活塞表面，并模拟缸内热流体与运动固体活塞间的共轭传热
- 固体活塞表面包含不同的边界：与缸套接触面，活塞环壁面，机油冷却面，缸内热流体加热面

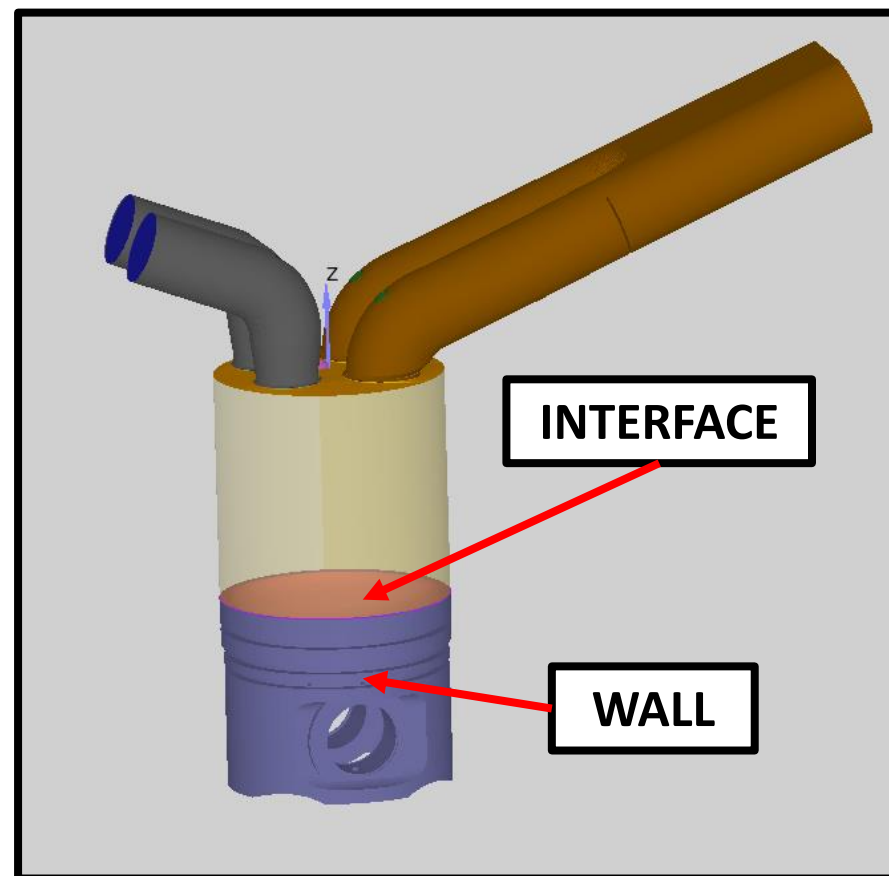


Solid Piston CHT: Part 1

- 设置内容如下，设置过程略
 - 将直喷供油改为预混供油
 - 替换活塞
 - 重构liner
 - 定义固体材料
 - 定义固体region和stream

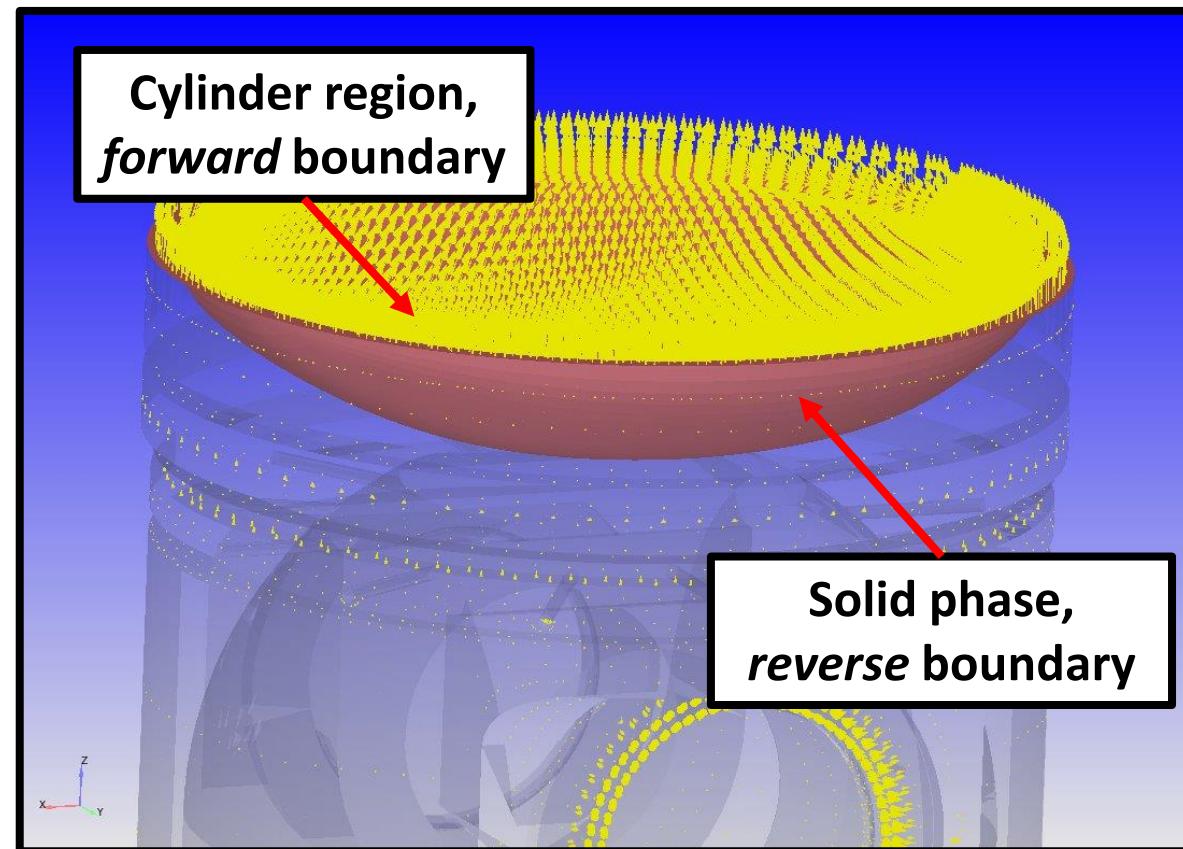
边界条件

- **INTERFACE:** 此类边界条件用来分隔两种不同的材料或不同的相
 - CHT模型需要包含至少一个INTERFACE 边界
- **WALL:** 该边界包含固体表面中与缸内气体域不接触的部分



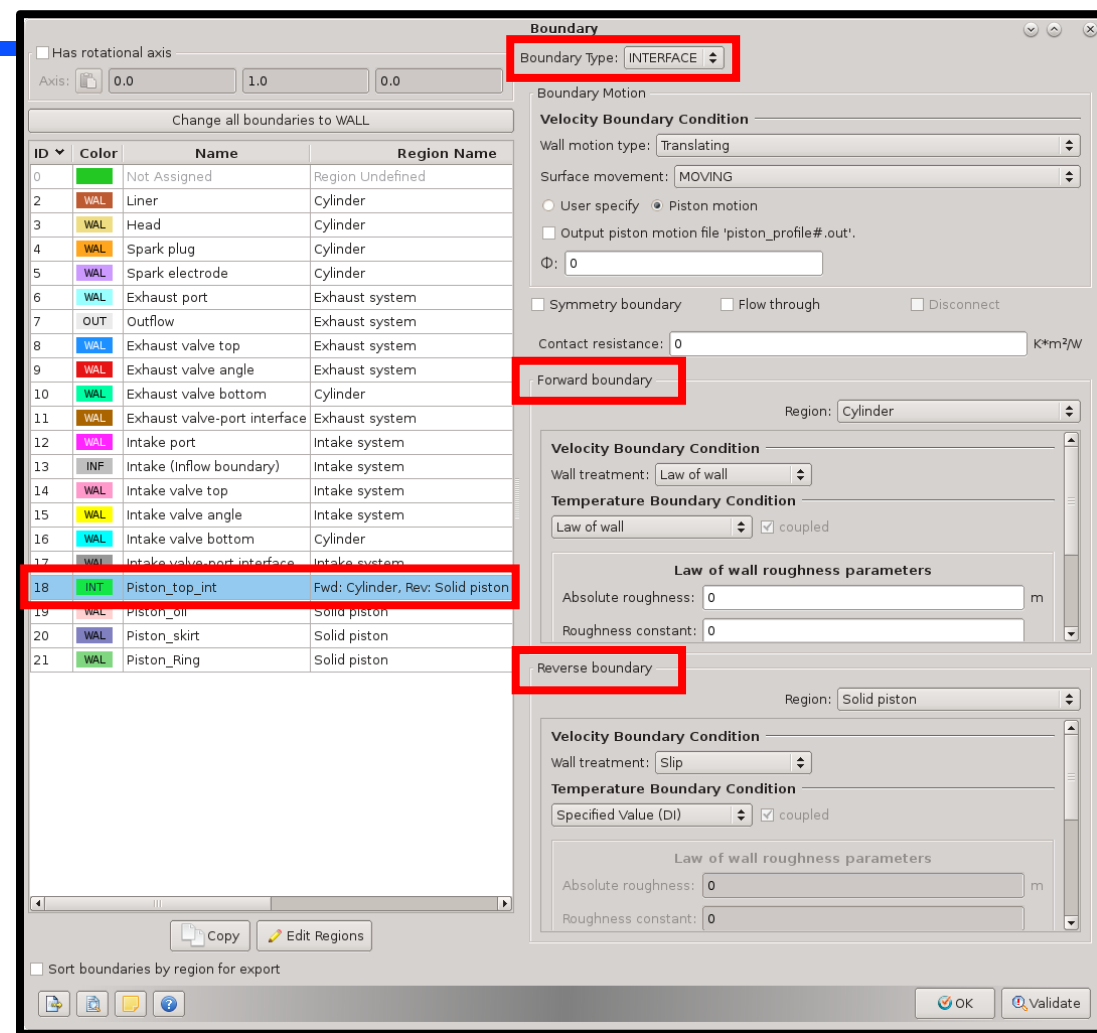
INTERFACE 边界 (1/2)

- 用户需要为每个interface边界定义正向 (*forward*) 和反向 (*reverse*) 边界
 - 表面法线方向代表正向 (*forward*) 边界
 - 表面法线的反向代表负向 (*reverse*) 边界



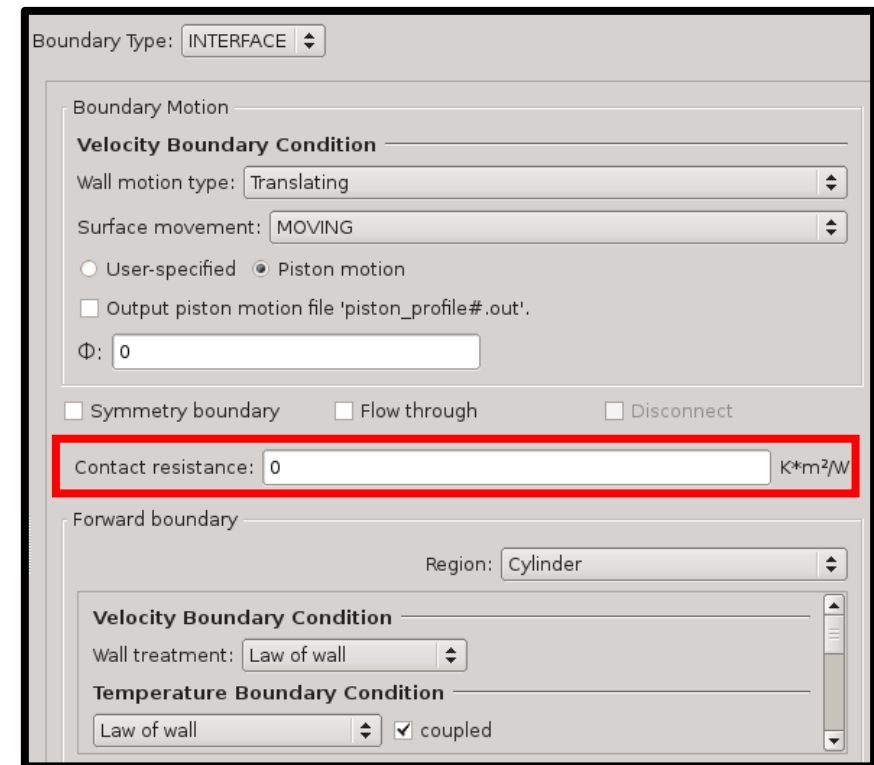
INTERFACE 边界 (2/2)

- 在 *Case Setup > Boundary Conditions > Boundary* 中选择 **INTERFACE** 边界，并为正向(*Forward*)边界和反向(*Reverse*)边界设置边界条件
- 在 *interface* 上，建议在固体侧比流体侧设置更高一级加密



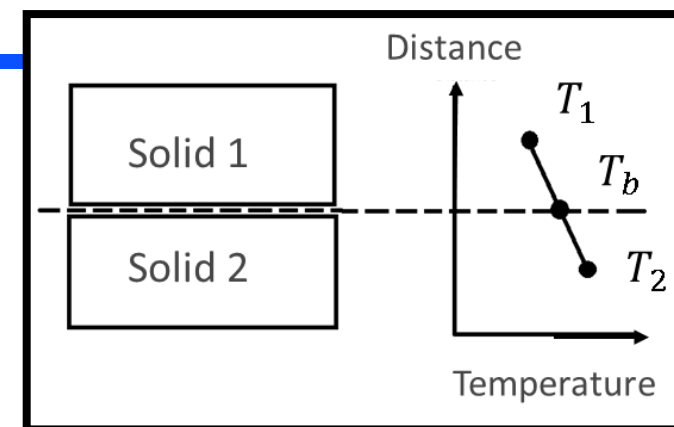
INTERFACE: Coupling (1/3)

- 为了使得热流通过interface边界，
CONVERGE将正向边界和负向边界耦合起来计算
 - CONVERGE只对流-固或固-固进行耦合计算
- 用户可使用接触热阻(Contact resistance) 来控制耦合类型

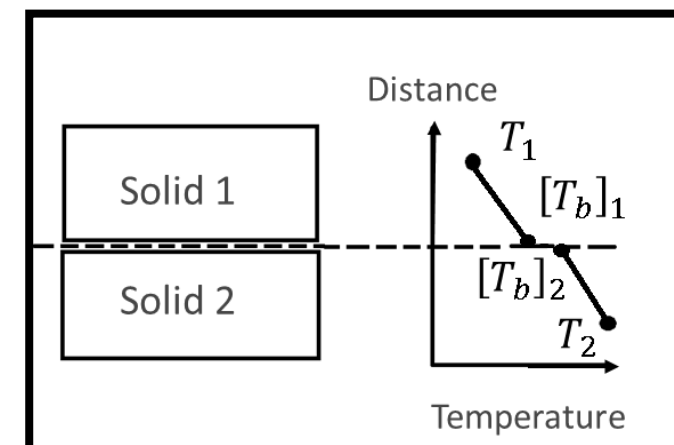


INTERFACE: Coupling (2/3)

- 存在两种耦合类型
 - Contact resistance = 0: 在interface上温度保持连续
 - Contact resistance > 0: 在interface上温度不连续
 - Fluid-solid: 热阻来自于隔热涂层
 - Solid-solid: 热阻来自于接触表面的粗糙度



Contact resistance = 0



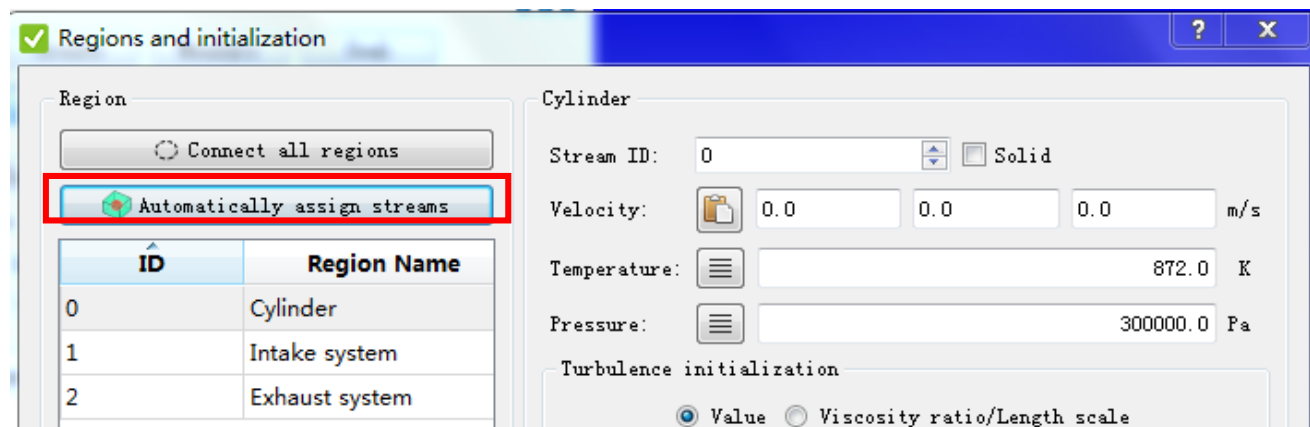
Contact resistance > 0

INTERFACE: Coupling (3/3)

- Solid-solid interface
 - 无论是 *forward* 还是 *reverse* 边界, *Temperature* 边界需要设为 *Dirichlet*
- Fluid-solid interface
 - 流体侧 *Temperature* 边界可以设为 *Law of wall* 或 *Dirichlet*
 - 固体侧 *Temperature* 边界必须设为 *Dirichlet*
- CHT模型可以包含 *sealing*, 但有以下限制
 - Seal不能cut interface边界
 - 固体域必须完全封闭

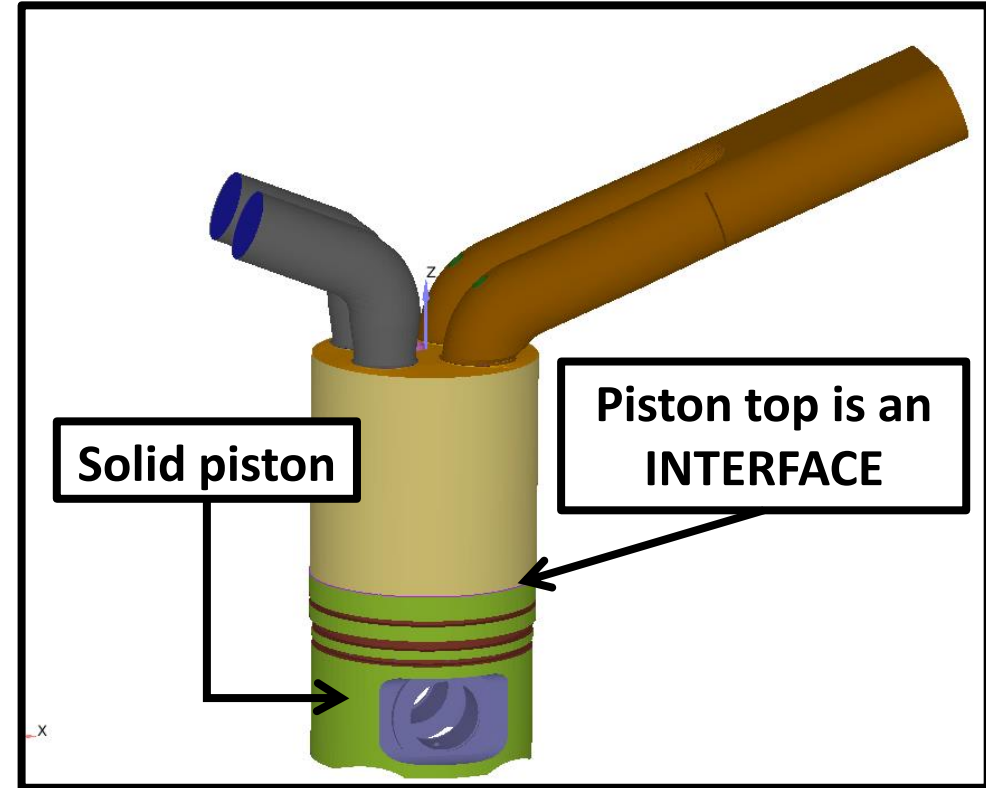
自动分配Stream工具

- CONVERGE Studio2.4新增自动分配stream工具 (Automatically assign streams) , 可用于CHT模型中机械牛自动stream, region和interface自动设置
 - 工具位置: *Case Setup > Initial Conditions & Events > Regions and initialization*
- 该工具要求几何中没有intersection或open edges, 并且已经完成边界分割 (无需设置type, region)
- CONVERGE Studio自动探测interface边界并自动设置其边界类型(interface), 自动创建region, 并设置合适的stream id, 并为所有边界指定所属region。



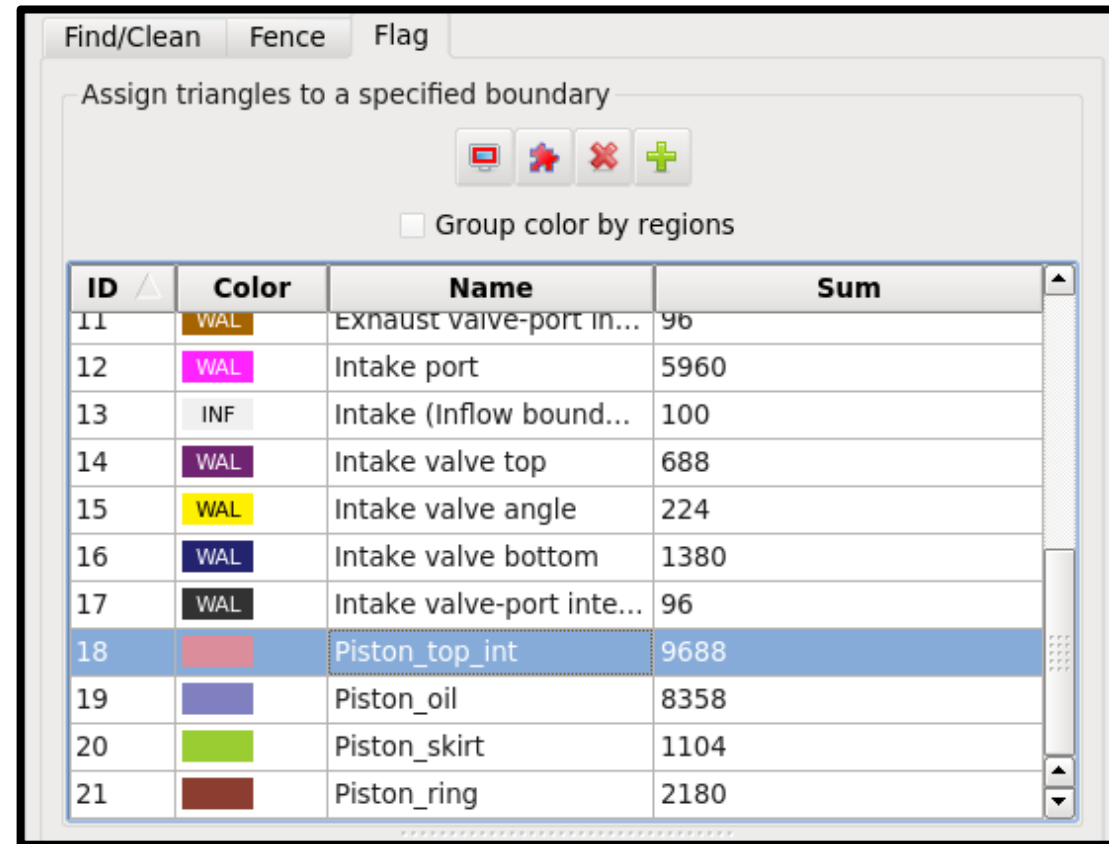
Solid Piston CHT: Part 2 (1/9)

- Part2演示如何设置interface



Solid Piston CHT: Part 2 (2/9)

- Step 1: 准备边界
 - a) 在 *Geometry > Boundary > Flag* 面板
 - b) 选择 boundary 1: *Piston_top*
 - c) 点击  按钮删除该边界
 - d) 将最后4个边界进行重命名
 - Boundary 18: *Piston_top_int*
 - Boundary 19: *Piston_oil*
 - Boundary 20: *Piston_skirt*
 - Boundary 21: *Piston_ring*



Find/Clean Fence Flag

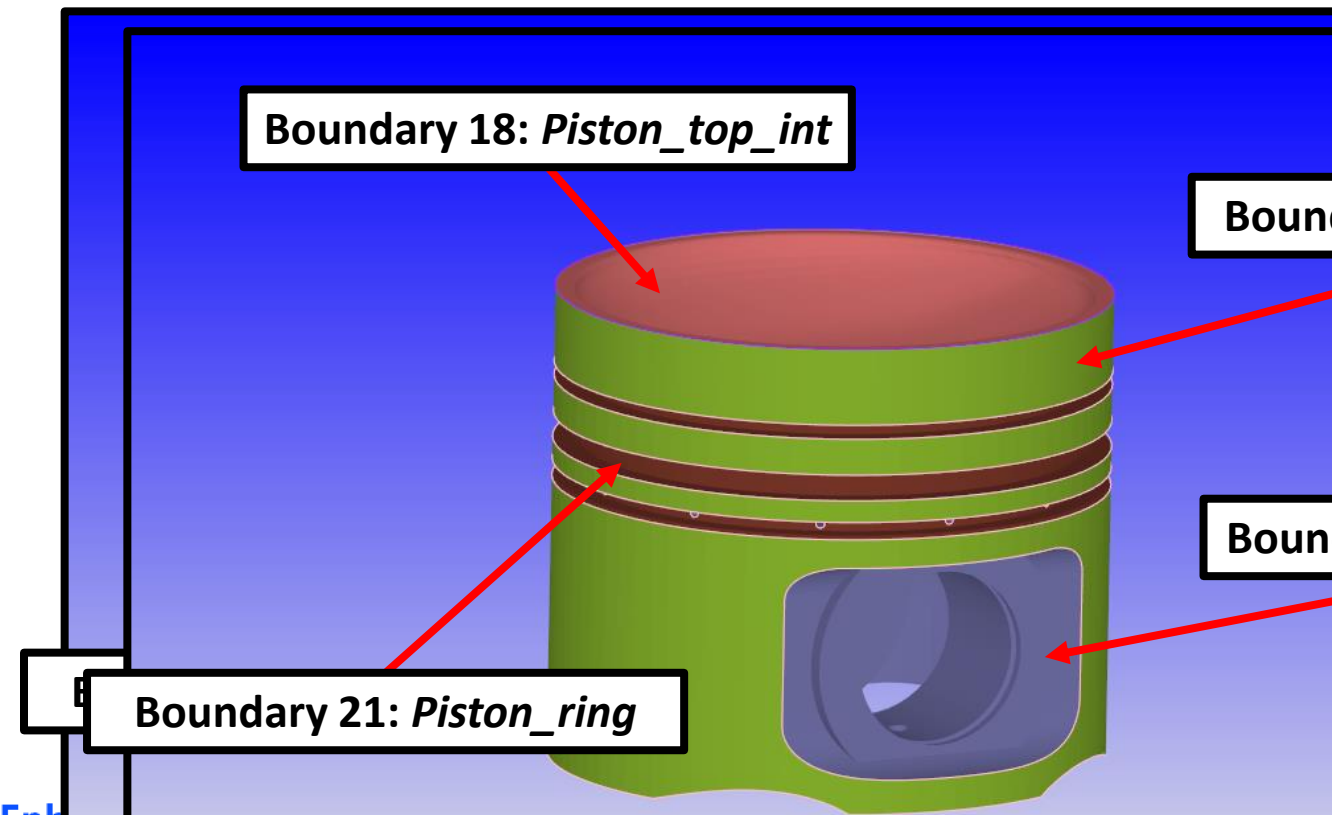
Assign triangles to a specified boundary

☐ Group color by regions

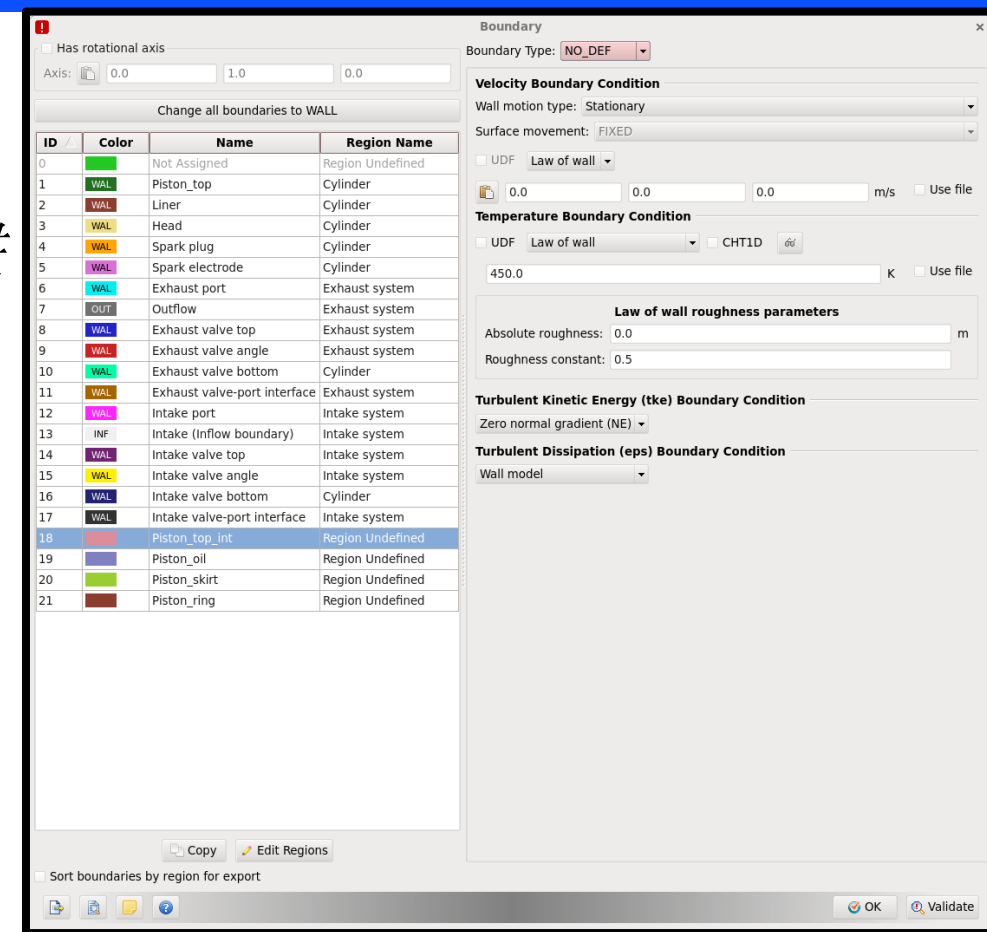
ID	Color	Name	Sum
11	WAL	Exhaust valve-port in...	96
12	WAL	Intake port	5960
13	INF	Intake (Inflow bound...	100
14	WAL	Intake valve top	688
15	WAL	Intake valve angle	224
16	WAL	Intake valve bottom	1380
17	WAL	Intake valve-port inte...	96
18		Piston_top_int	9688
19		Piston_oil	8358
20		Piston_skirt	1104
21		Piston_ring	2180

Solid Piston CHT: Part 2 (3/9)



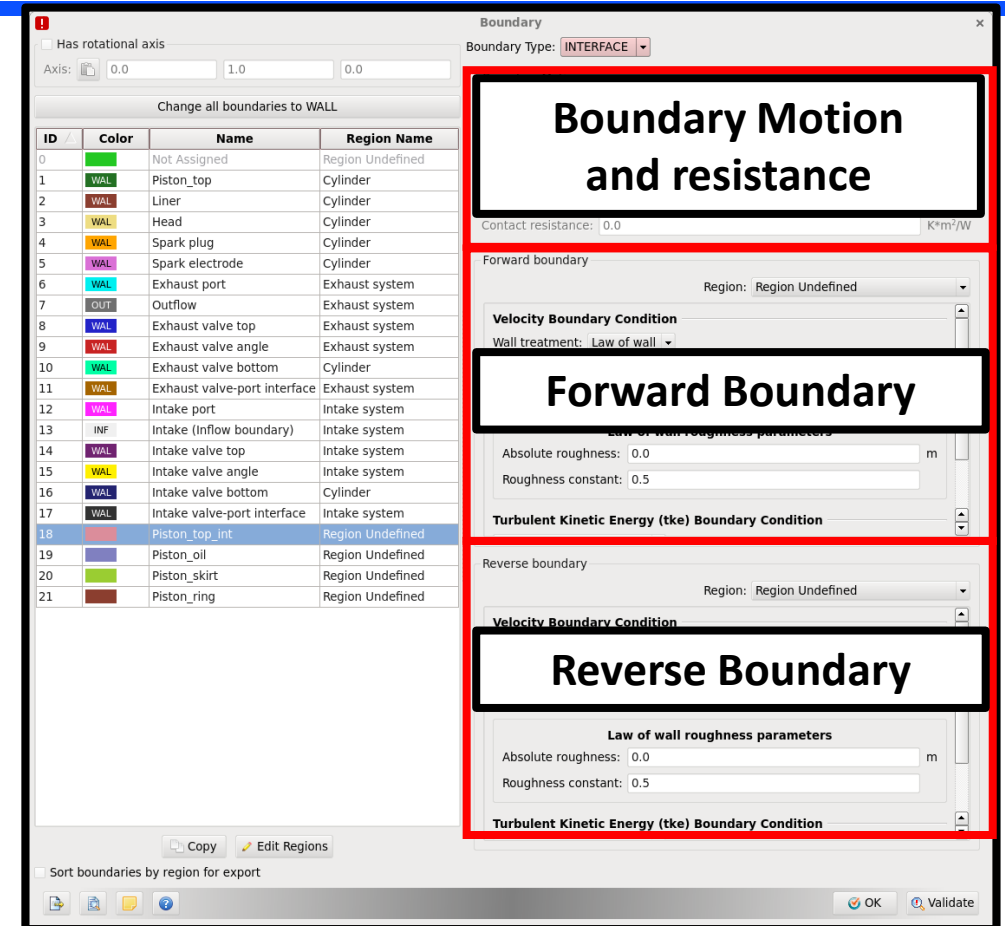
Solid Piston CHT: Part 2 (4/9)

- Step 2: 定义 interface
 - a) 在boundary 18: *Piston_top_int* 双击, 进入 *Boundary Conditions > Boundary* 面板
 - 该边界即为缸内热流体与活塞固体间的 interface



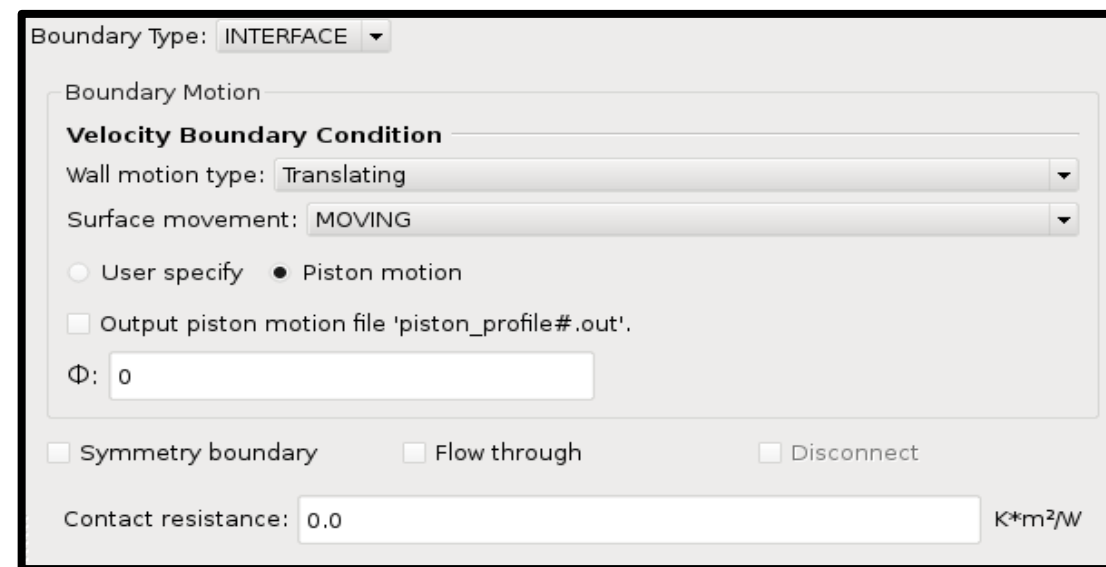
Solid Piston CHT: Part 2 (5/9)

- Step 2: 定义 interface
 - b) 设置其 Boundary Type 为 *INTERFACE*
 - c) 此处需要对每个interface边界进行三块设置:
 - a) *Boundary Motion and resistance*
 - b) *Forward boundary*
 - c) *Reverse boundary*



Solid Piston CHT: Part 2 (6/9)

- Step 3: 定义INTERFACE boundary motion and resistance
- CONVERGE会将运动和热阻应用到interface的两侧
 - a) 将 Wall motion type 设为 *Translating*
 - b) 将 Surface movement 为 *MOVING* 并勾选 Piston motion
 - c) 确认 Contact resistance 为0
 - Interface处将不存在温度的阶跃



The screenshot shows the 'Boundary Type: INTERFACE' dialog box. Under 'Boundary Motion', the 'Velocity Boundary Condition' is set to 'Translating'. The 'Surface movement' is set to 'MOVING'. The 'Piston motion' radio button is selected. The 'Contact resistance' is set to '0.0' with units 'K*m²/W'.

Boundary Type: INTERFACE

Boundary Motion

Velocity Boundary Condition

Wall motion type: Translating

Surface movement: MOVING

☐ User specify ☒ Piston motion

☐ Output piston motion file 'piston_profile#.out'.

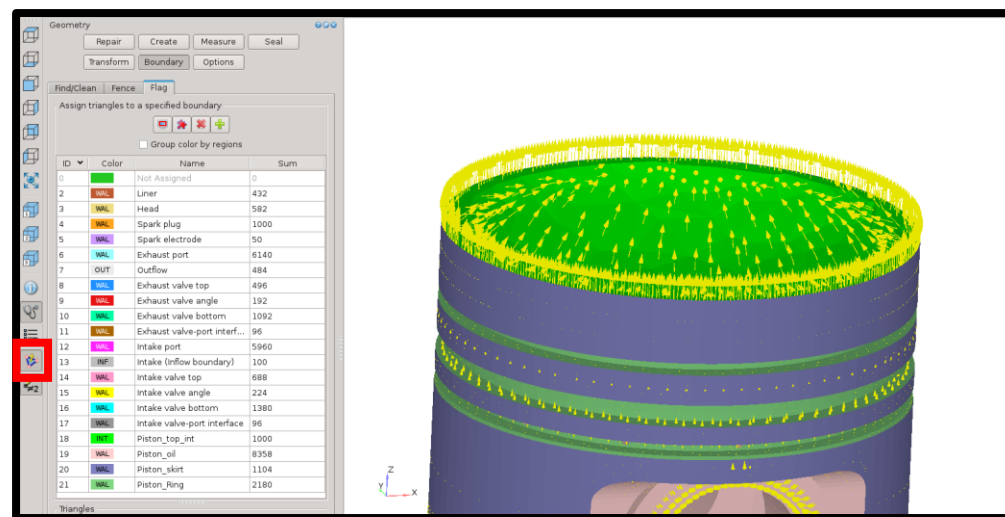
Φ : 0

☐ Symmetry boundary ☐ Flow through ☐ Disconnect

Contact resistance: 0.0 K*m²/W

Solid Piston CHT: Part 2 (7/9)

- Step 4: 设置forward 和 reverse 边界
 - a) 点击  图标显示表面法线，并以此确定 forward 和 reverse 边界
 - 活塞顶面发现指向cylinder region, 因此forward boundary region应为Cylinder



Solid Piston CHT: Part 2 (8/9)

- Step 5: 设置边界条件

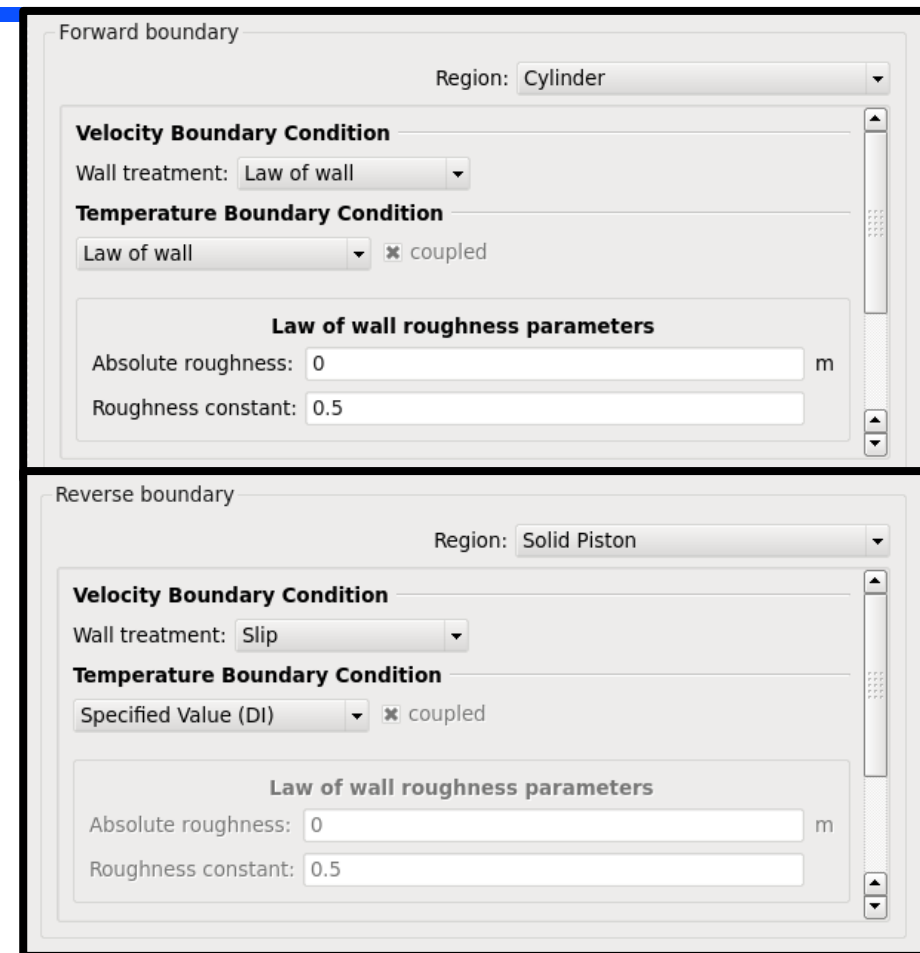
- a) 对 *Forward boundary* (gas phase)

- 设置 Region 为 *Cylinder*
 - 设置 Velocity Wall treatment 为 *Law of wall*
 - 设置 *Temperature Boundary Condition* 为 *Law of wall*

- b) 对 *Reverse boundary* (solid phase)

- 设置 Region 为 *Solid Piston*
 - 设置 Velocity Wall treatment 为 *Slip*
 - 设置 *Temperature Boundary Condition* 为 *Specified Value (DI)*

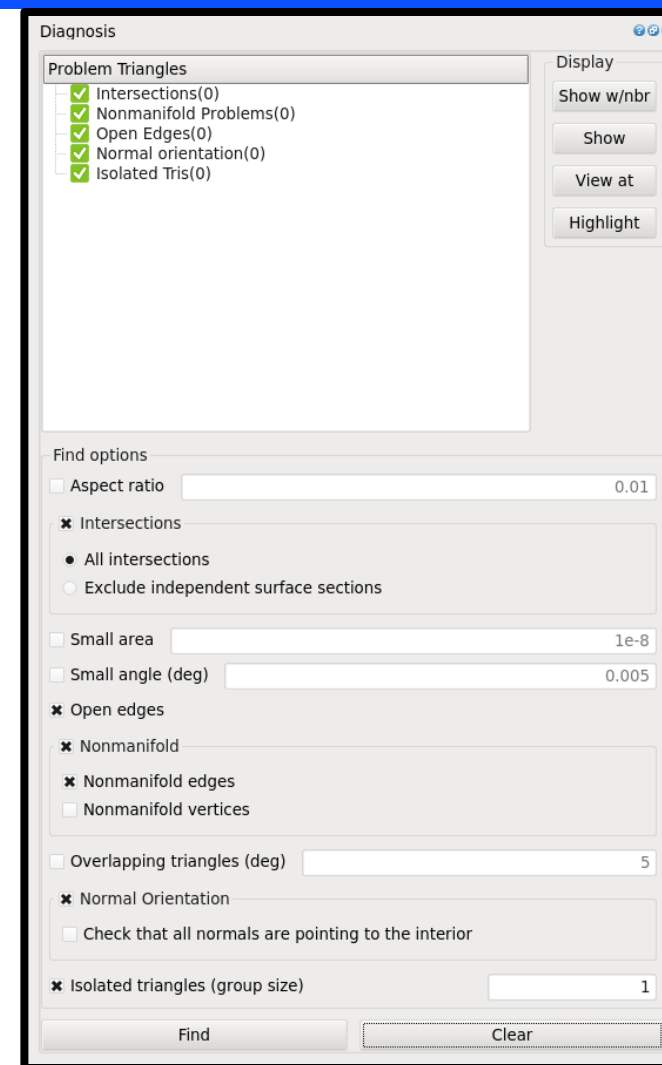
- c) 至此完成interface设置



The screenshot displays two panels for setting boundary conditions. The top panel is for the 'Forward boundary' with the 'Region' set to 'Cylinder'. It shows the 'Velocity Boundary Condition' as 'Law of wall' and the 'Temperature Boundary Condition' as 'Law of wall' with a 'coupled' checkbox checked. Below these, the 'Law of wall roughness parameters' are set to 'Absolute roughness: 0 m' and 'Roughness constant: 0.5'. The bottom panel is for the 'Reverse boundary' with the 'Region' set to 'Solid Piston'. It shows the 'Velocity Boundary Condition' as 'Slip' and the 'Temperature Boundary Condition' as 'Specified Value (DI)' with a 'coupled' checkbox checked. Below these, the 'Law of wall roughness parameters' are set to 'Absolute roughness: 0 m' and 'Roughness constant: 0.5'.

Solid Piston CHT: Part 2 (9/9)

- Step 6: 诊断表面
 - a) 启动 *Diagnosis* 面板
 - b) 点击 Find
- 不再出现non-manifold问题



WALL Boundary

- 对于solid WALL, 可以选用以下四种 *Temperature boundary conditions* 任意一种:
 - *Dirichlet*: 直接指定壁温
 - *Heat flux*: 指定单位面积的热流
 - 负值表示热流进入固体域
 - 正值表示能量流出固体域
 - *Convection*: 指定heat transfer coefficient (HTC) 和 far-field temperature
 - *Radiation Convection*: 指定HTC, far-field temperature, 和 radiation source temperature, 以及 emissivity

Temperature Boundary Condition

☐ UDF ☐ Specified Value (DI) ☐ coupled ☐ CHT1D 

298.0 K ☐ Use file

Temperature Boundary Condition

☐ UDF ☐ Heat flux ☐ coupled ☐ CHT1D 

Flux: -1000.0 W/m² ☐ Use file

Temperature Boundary Condition

☐ UDF ☐ Convection ☐ coupled ☐ CHT1D 

Far field temperature: 298.0 K ☐ Use file

Heat transfer coefficient: 1.5 W/m²/K

Temperature Boundary Condition

☐ UDF ☐ Radiation Convection ☐ CHT1D 

Far field temperature: 300.0 K ☐ Use file

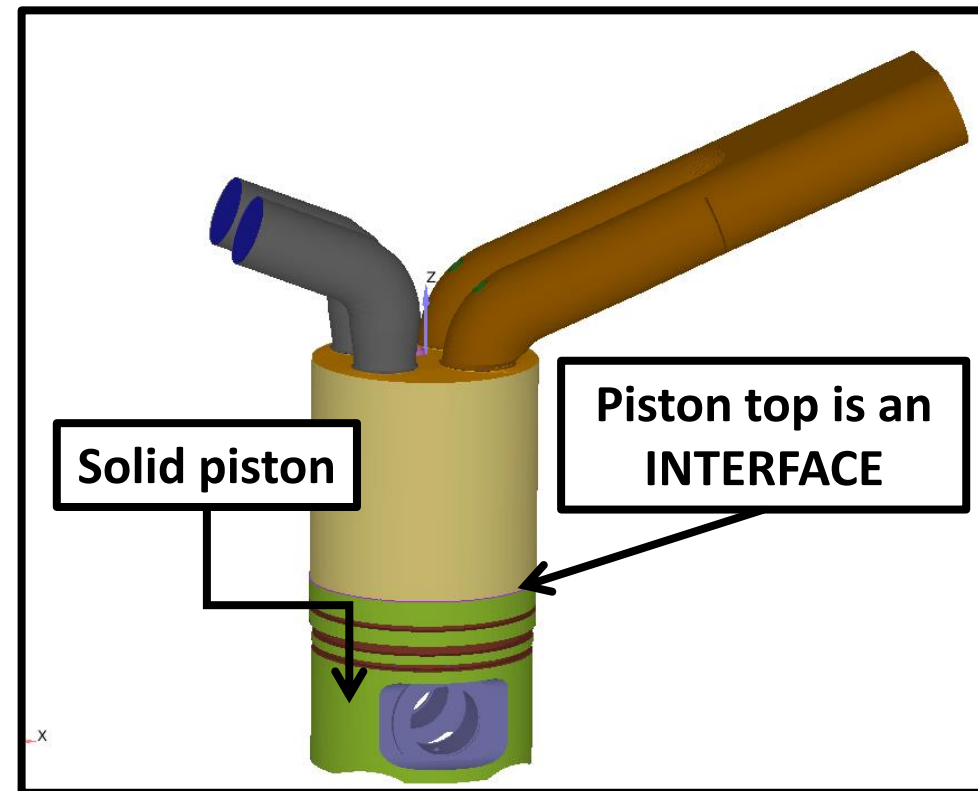
Heat transfer coefficient: 0.1 W/m²/K

Radiation Source Temperature: 300.0 K

Emissivity: 1.0

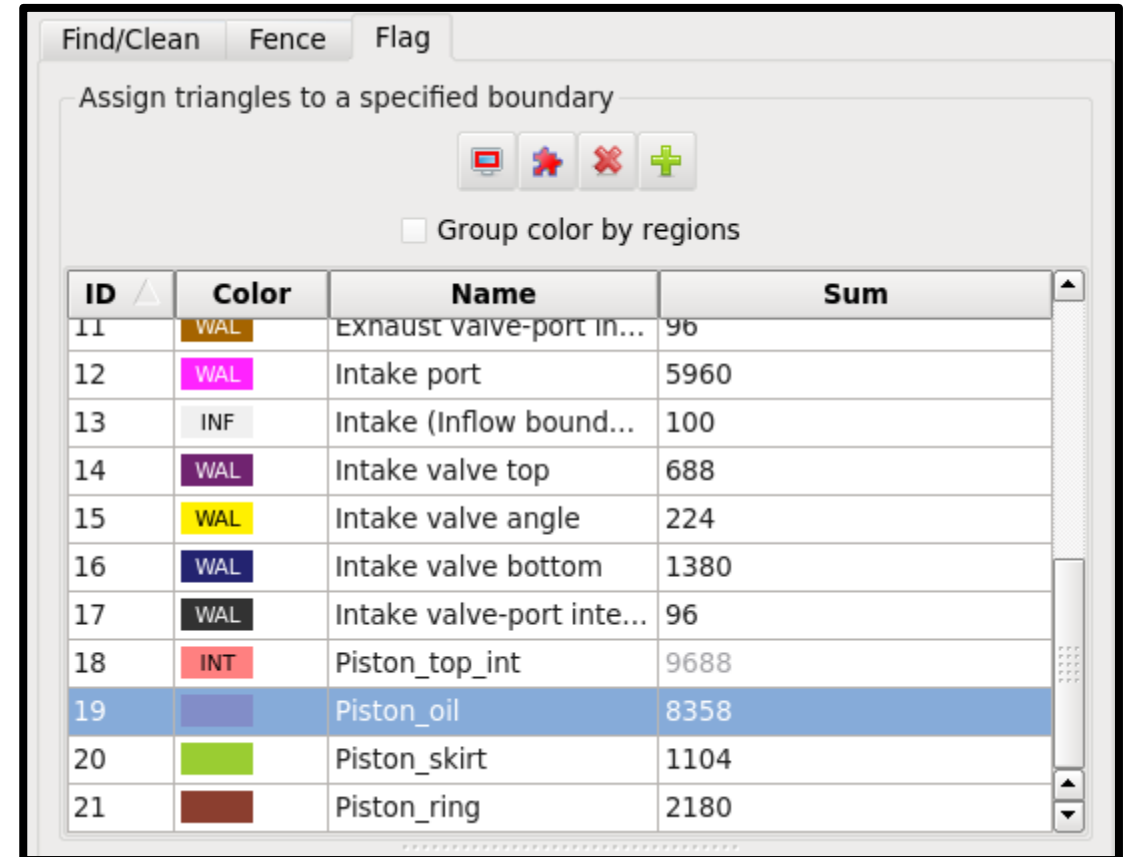
Solid Piston CHT: Part 3 (1/6)

- Part3演示如何设置固体壁面边界条件和 interface embedding加密



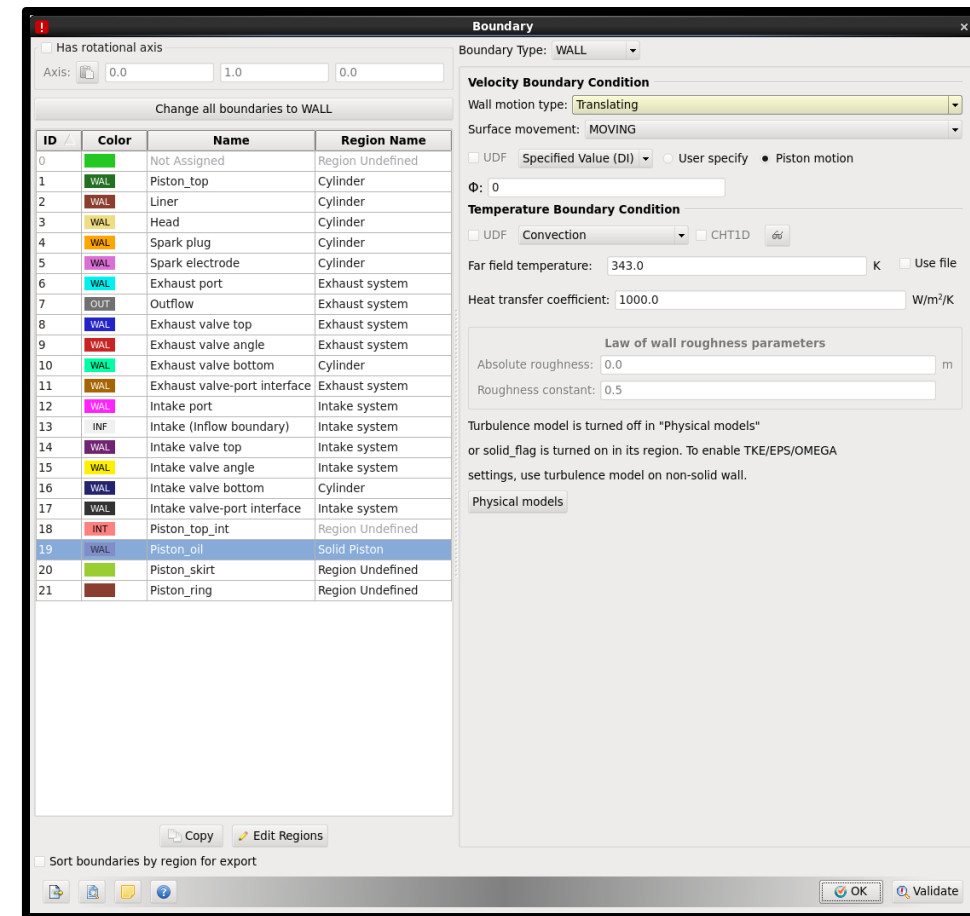
Solid Piston CHT: Part 3 (2/6)

- Step 1: 设置 *Piston_oil* solid wall boundary
 - a) 进入 *Geometry > Boundary > Flag*
 - b) 在 boundary 19: *Piston_oil* 双击打开 *Boundary Conditions > Boundary* 面板
- *Piston_oil* boundary 为活塞与机油接触的表面



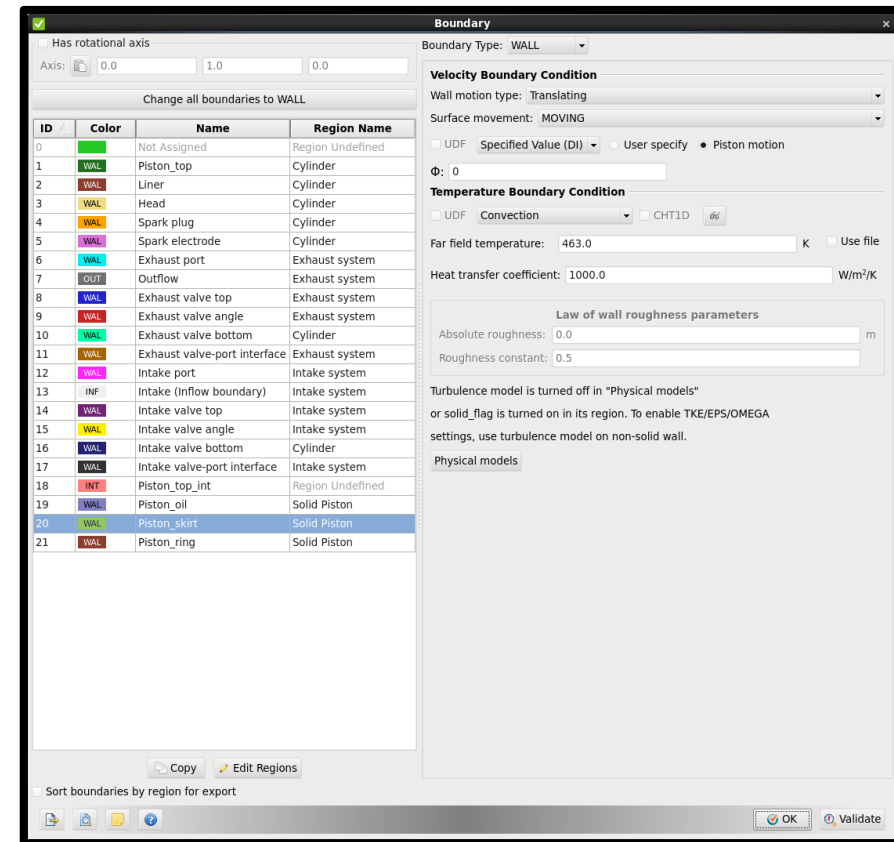
Solid Piston CHT: Part 3 (3/6)

- Step 1: 设置 *Piston_oil* solid wall boundary
 - c) 设置 Boundary Type 为 *WALL*
 - 设置 Velocity Wall motion type 为 *Translating*
 - 设置 Surface movement 为 *MOVING*
 - 选择 *Specified Value (DI)* 并勾选 Piston motion
 - 设置 Temperature Boundary Condition 为 *Convection*
 - 设置 Far Field Temperature 为 343 K (机油参考温度)
 - 设置 Heat transfer coefficient 为 $1000\text{W/m}^2/\text{K}$
 - d) 设置 Region Name 为 *Solid Piston*



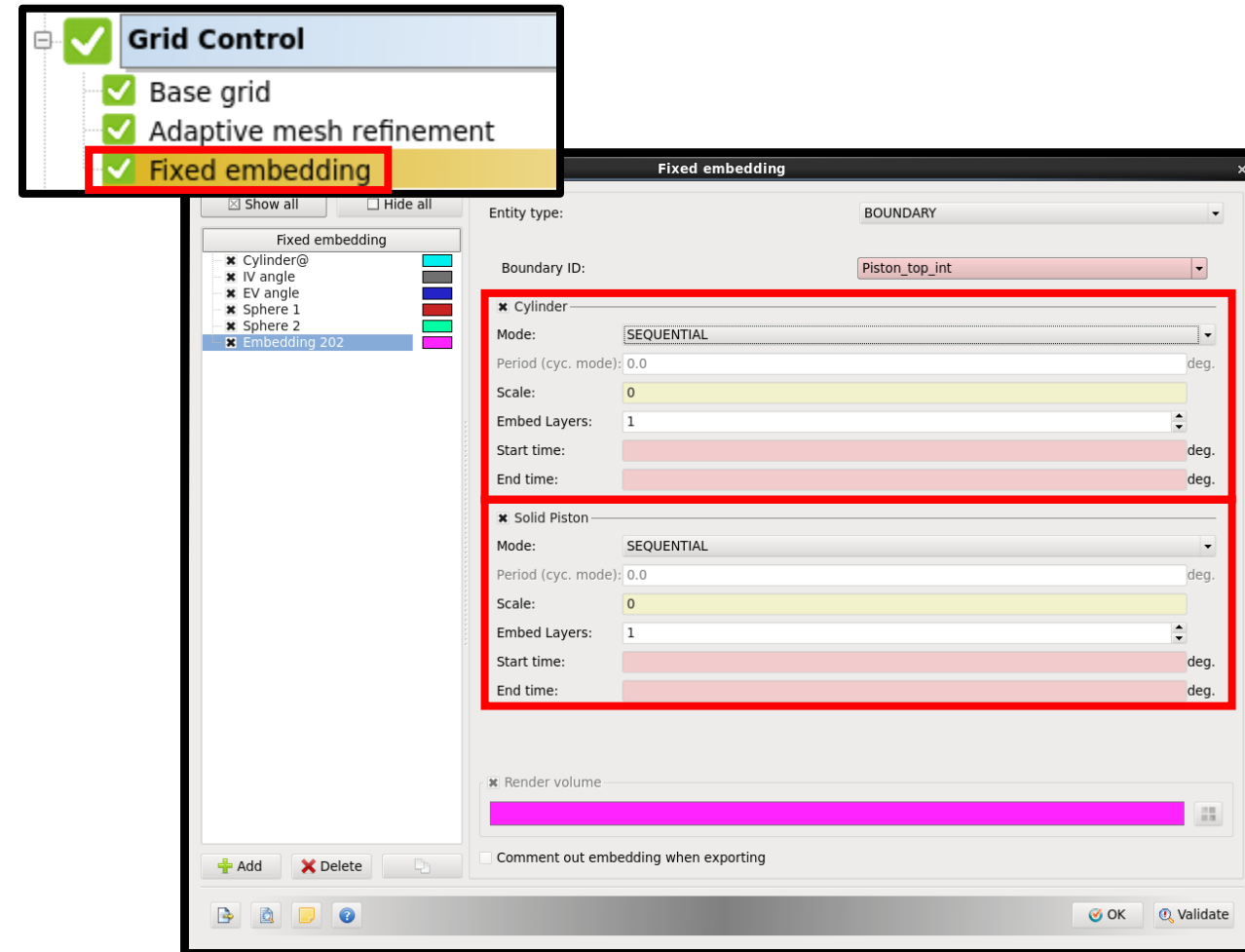
Solid Piston CHT: Part 3 (4/6)

- Step 2: 设置其它两个固体壁面
- 对所有归属于solid piston region的边界，其Wall motion必须保持一致
 - a) 对其它两个壁面进行与Piston_oil相同的设置，除了温度不同
 - Boundary 20: *Piston_skirt*
 - 设置 Far Field Temperature 为 463 K (liner参考温度)
 - 设置 Heat transfer coefficient 为 1000 W/m²/K
 - Boundary 21: *Piston_ring*
 - 设置 Far-Field Temperature 为 493 K (活塞环温度)
 - 设置 Heat transfer coefficient 为 500 W/m²/K
 - b) 点击 OK



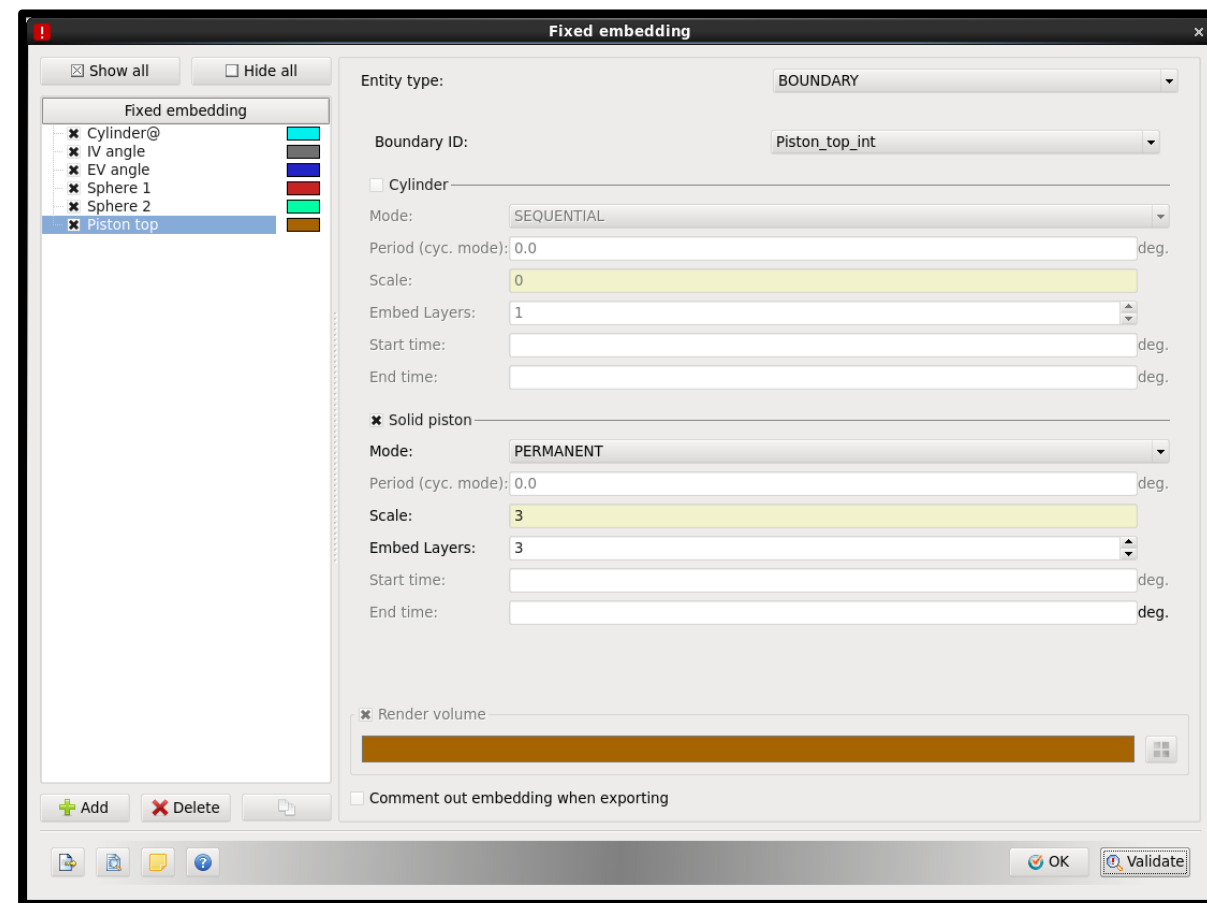
Solid Piston CHT: Part 3 (5/6)

- Step 3: 在interface一侧设置 embedding
 - a) 打开 *Case Setup > Grid Control*
> Fix  embedding 面板
 - b) 点击  添加一项新的 embedding
 - c) 设置 Entity type 为 *Boundary*
 - d) 设置 Boundary ID 为 piston top interface (*Piston_top_int*)



Solid Piston CHT: Part 3 (6/6)

- Step 3: 在interface一侧设置 embedding
 - a) 取消勾选 Cylinder，保持 Solid piston 勾选
 - b) 设置 Mode 为 *Permanent*
 - c) 设置 Scale 为 3
 - d) 设置 Embed Layers 为 3
 - e) 点击 OK

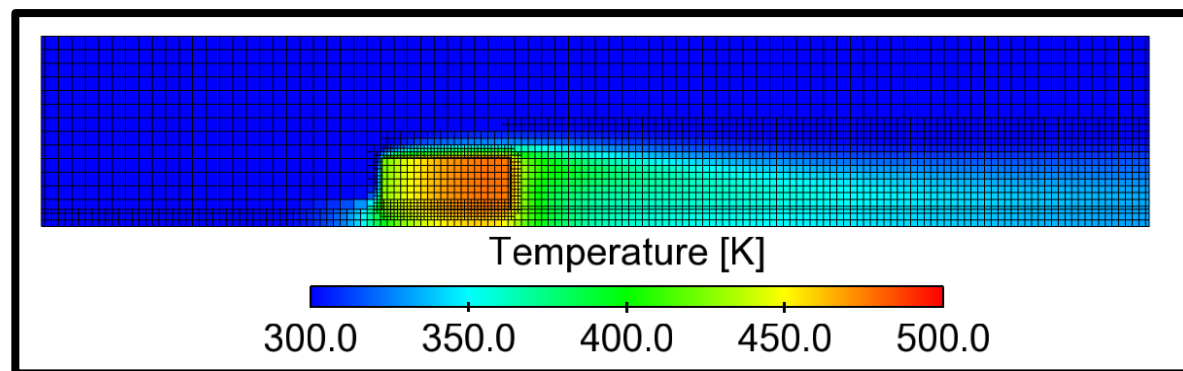


3DCHT模拟时间控制

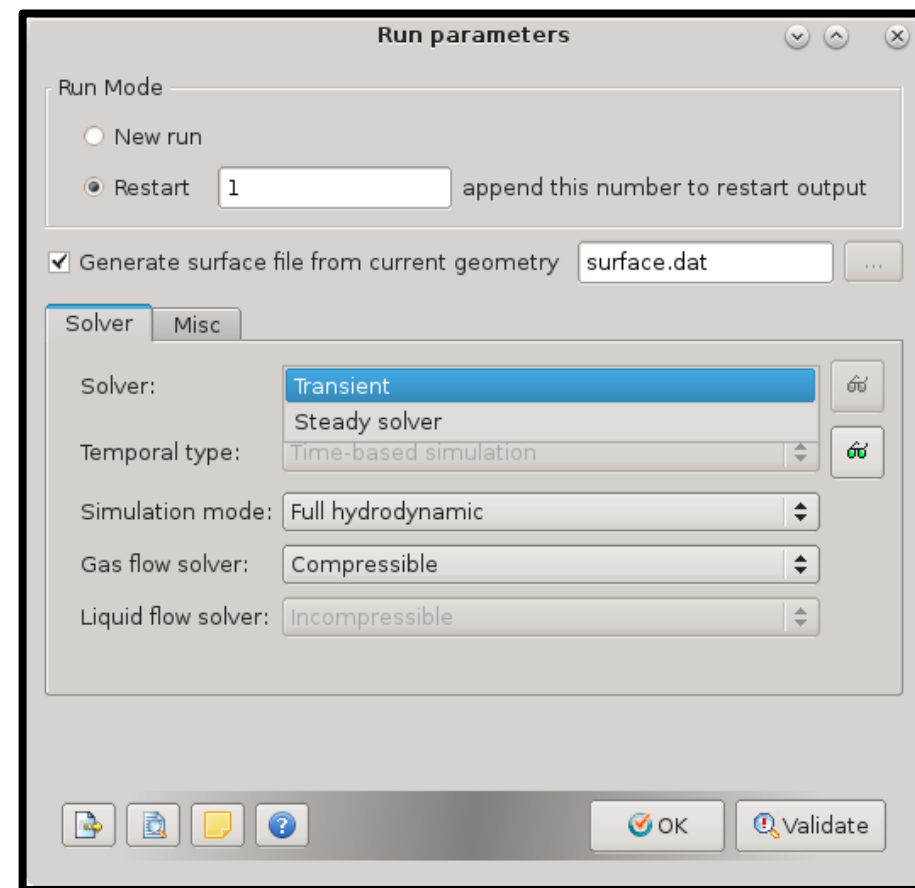
- CONVERGE为3DCHT模型提供了三种时间控制方法:
 - **Transient:** 对整个计算域采用相同的时间步长，一起求解流体域和固体域（例如模拟heated box附近的自然对流）
 - **Steady-state:** 采用稳态方法求解流体和固体域，获得最终稳定状态结果（例如模拟围绕固体的强制对流现象）
 - **Super-cycling:** 交替对整个计算域进行瞬态流动传热计算和仅对固体域进行稳态导热计算

时间控制: Steady-State 和 Transient

- 设置steady-state 或 transient 时间模式, 进入 *Case Setup > Simulation Parameters > Run parameters > Solver* 面板, 并选择需要的 Solver



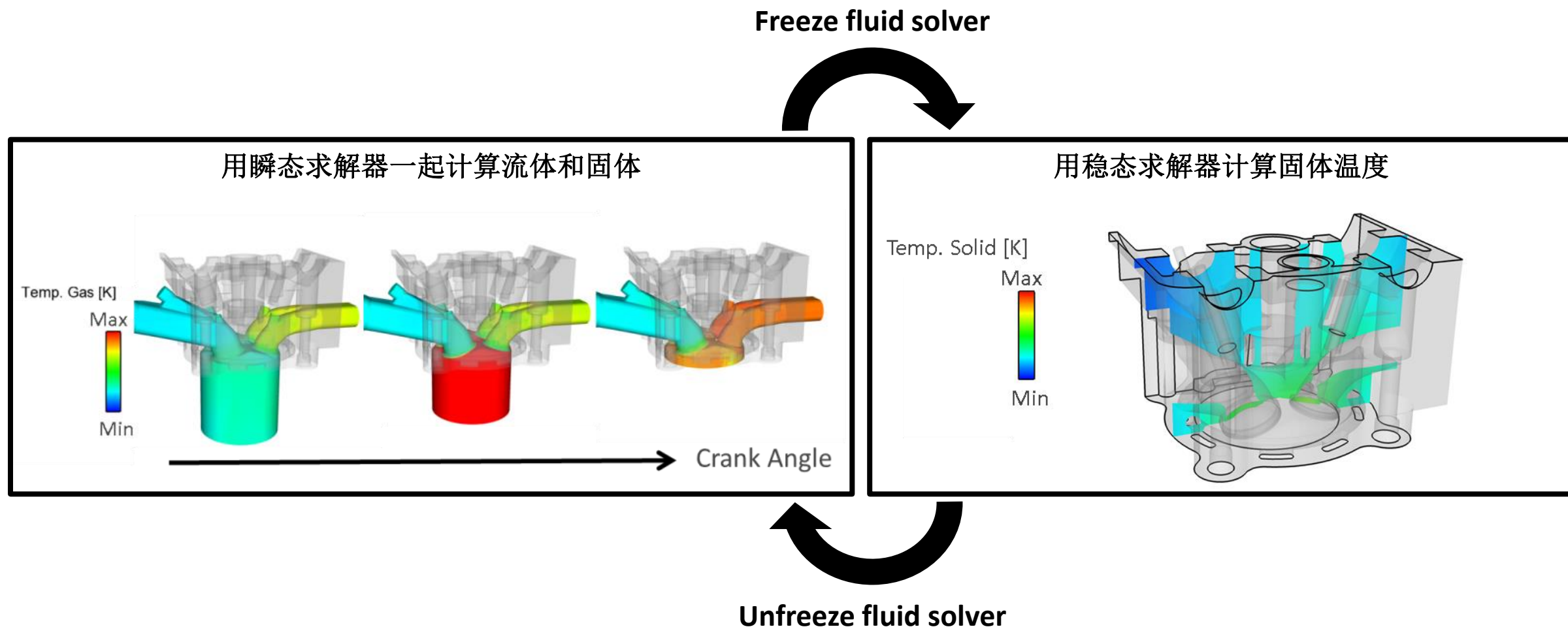
强制对流共轭传热案例



时间控制: Super-Cycling [简介] (1/2)

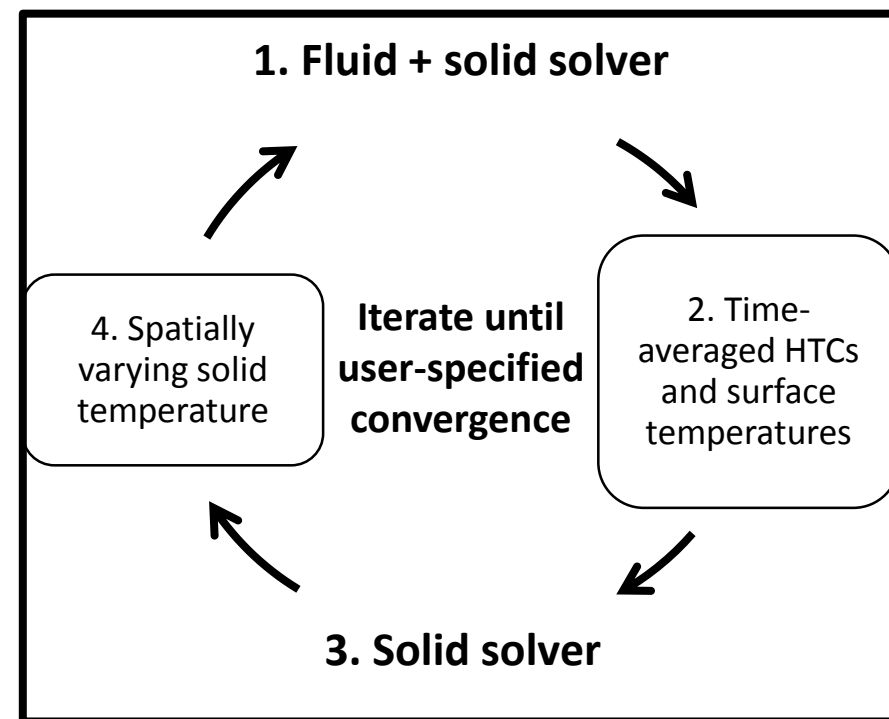
- 对于发动机，固体传热的特征时间通常远远大于流体传热特征时间
 - 需要经过成百上千个循环固体温度才可能达到稳定
- Super-cycling技术的引入可以大大加速3DCHT问题中固体温度达到稳定的时间，通常3-5个循环发动机固体温度即可达到稳定。
- Super-cycling技术交替使用全耦合瞬态求解器和固体稳态求解器
 - 先采用瞬态求解器整体耦合求解流体和固体传热
 - 再周期性地冻结流体求解器，单独计算固体达到温度稳定状态
 - 然后采用更新的固体壁面温度用瞬态求解器计算流体和固体
 - 重复以上过程直至固体温度达到稳定

时间控制: Super-Cycling [简介](2/2)



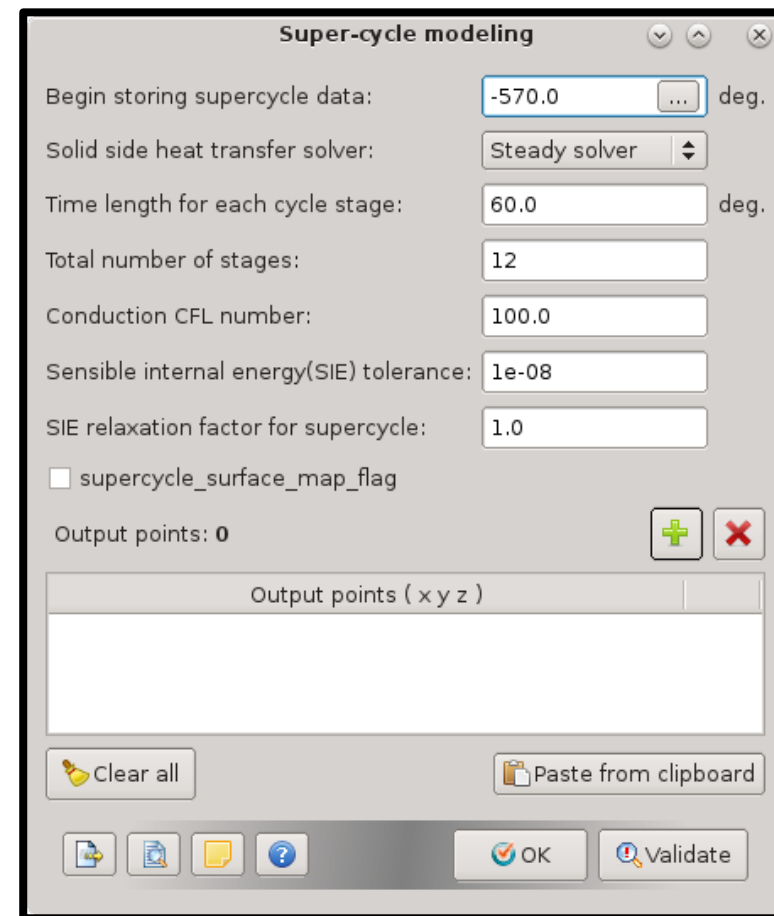
时间控制: Super-Cycling [流程] (1/2)

- Super-Cycling流程:
 1. 采用瞬态求解器整体计算流体和固体域
 - 此过程中保存interface上的瞬时HTC和近壁流体温度
 2. 冻结流体求解器
 - 对HTC和近壁流体温度求平均，并将其作为边界条件应用到interface上
 3. 求解器固体温度直至稳定
 4. 更新固体壁面温度，解冻流体求解器
 5. 重复以上过程直至固体温度达到稳定



时间控制: Super-Cycling [流程] (2/2)

- 对于周期性系统, 时均数据需要能够表征整个工作循环 (e.g., 720 CAD for 4-stroke and 360 CAD for 2-stroke engines)
- 时均数据中包含一系列的数据段(stage), 从而包含整个周期的累积HTC和气膜温度
 - 每个 stage 包含一段时间的数据, 时间段长度通过 Time length for each cycle stage 指定
 - 如果 Total number of stages = 1, 则只用最近的一个stage的平均数据来计算固体温度
 - 如果 Total number of stages > 1, 则用多个stage的平均数据来计算固体温度
 - 随着时间推进, 时均数据中加入新的stage数据, 并去除旧的stage数据



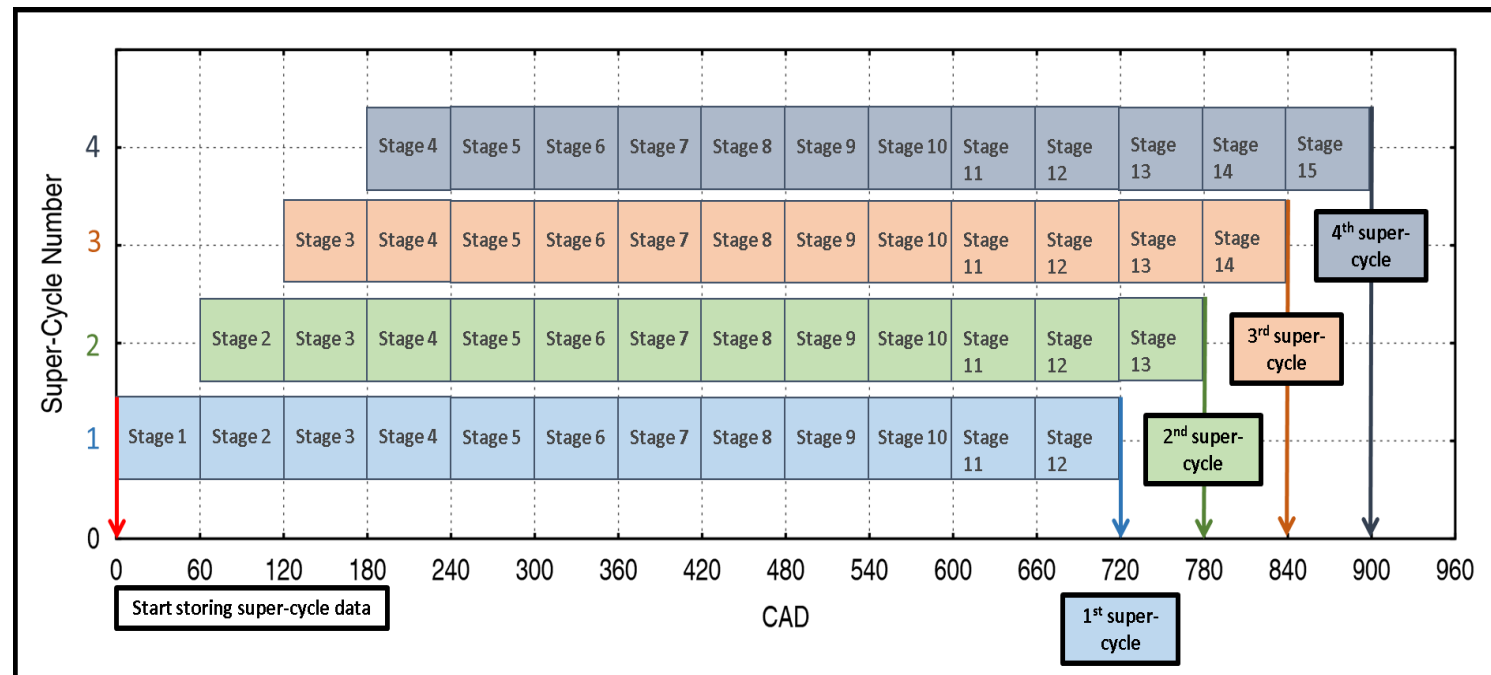
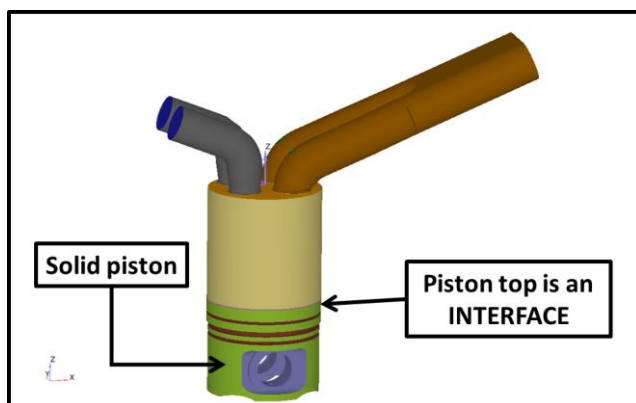
The screenshot shows the 'Super-cycle modeling' dialog box with the following settings:

- Begin storing supercycle data: -570.0 deg.
- Solid side heat transfer solver: Steady solver
- Time length for each cycle stage: 60.0 deg.
- Total number of stages: 12
- Conduction CFL number: 100.0
- Sensible internal energy(SIE) tolerance: 1e-08
- SIE relaxation factor for supercycle: 1.0
- ☐ supercycle_surface_map_flag
- Output points: 0

Buttons at the bottom include 'Clear all', 'Paste from clipboard', 'OK', and 'Validate'.

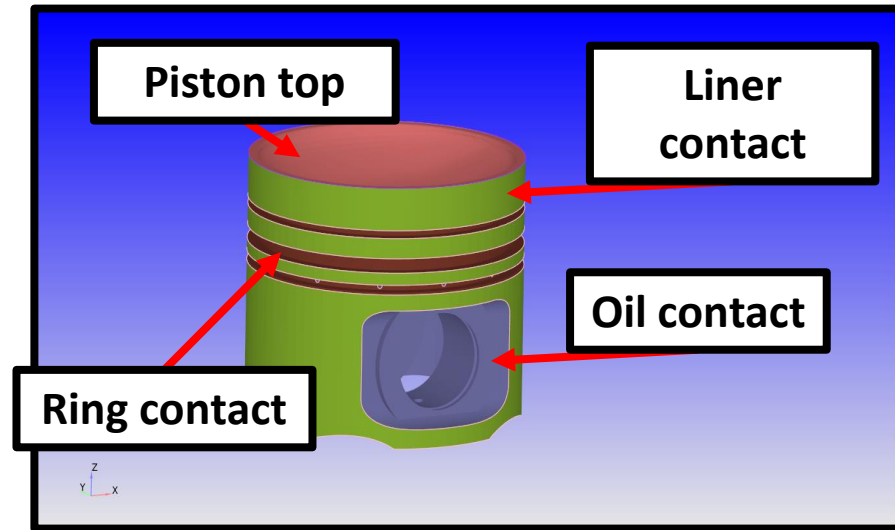
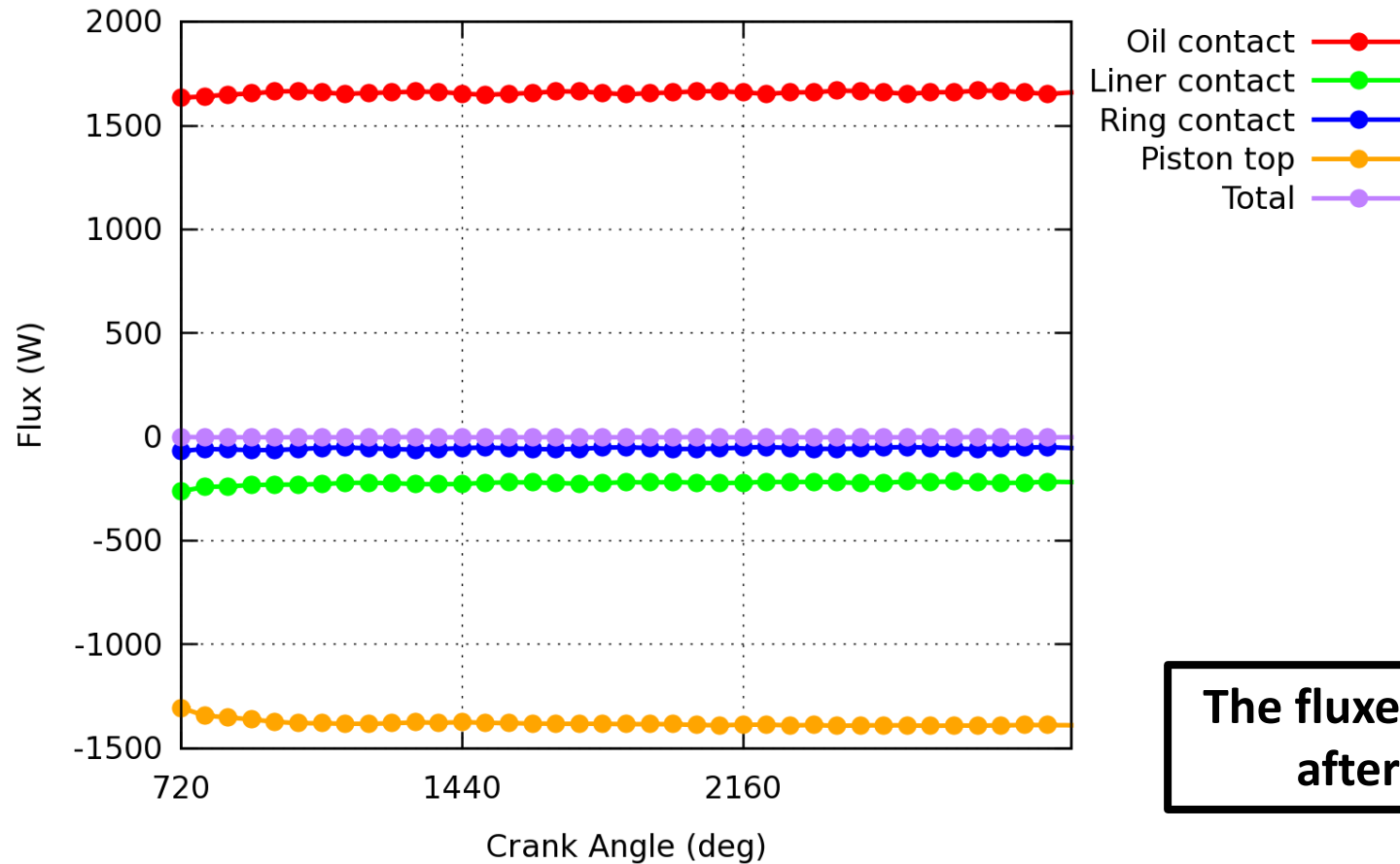
Super-Cycling: 案例 (1/3)

- 对于本案所介绍的案例，进行4个完整循环的燃烧计算
- Super-cycle 设置如下：
 - Begin storing supercycle data = 0
 - Total number of stages = 12
 - Time length for each cycle stage = 60 CAD



Super-Cycling: 案例 (3/3)

Fluxes through different parts of the solid piston



The fluxes reach steady-state after 3 engine cycles

后处理 (1/3)

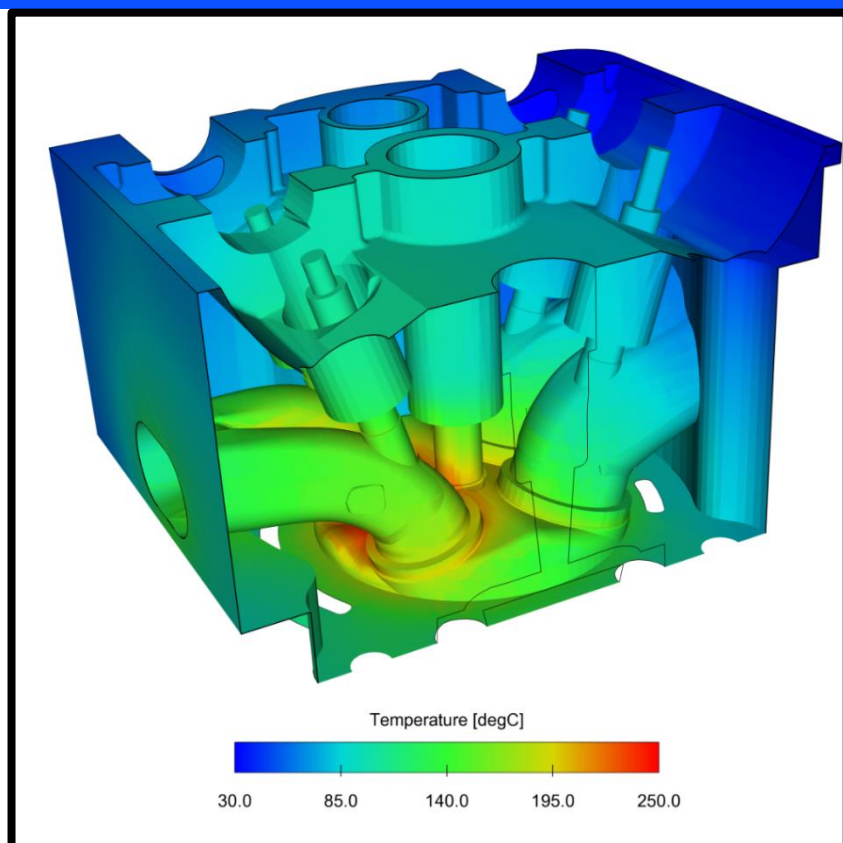
- 用户可通过设置monitor points (可监控指定变量) 和 super-cycle monitor points (监控固体温度)来追踪计算域中指定点的物理量变化
- 如果启用了super-cycling,在每个super-cycle完成时, 求解器会输出名为 *supercycle_stream*_balance.out* (where * indicates the stream number)的文件, 包含这一阶段的能量平衡数据
 - 每个solid stream对应一个文件
 - 第一列是时间数据, 最后一列是求和数据
 - 中间的数据取决于具体模型情况

后处理(2/3)

- Sample *supercycle_stream*_balance.out*

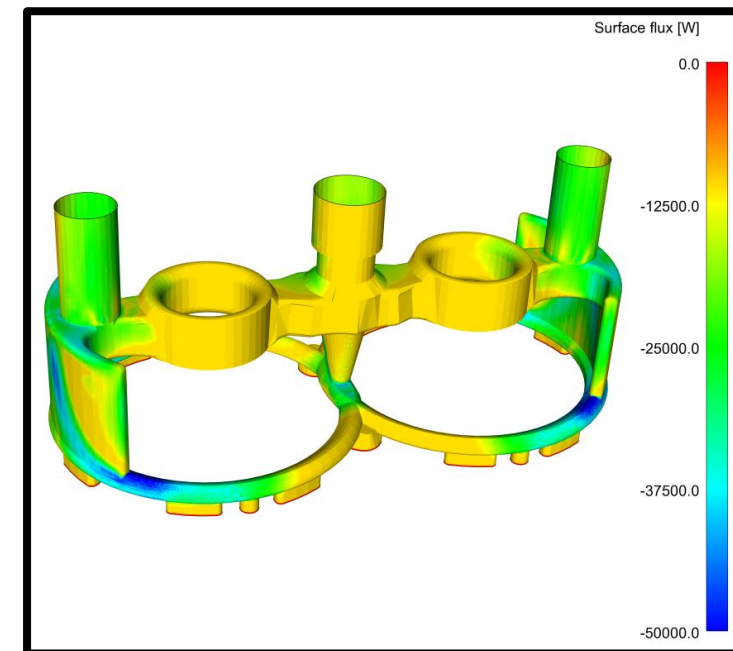
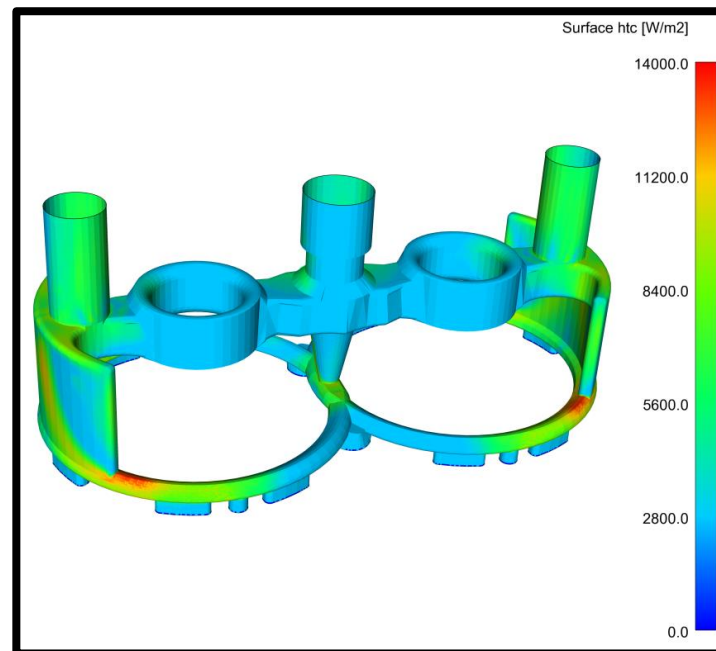
```
# CONVERGE Release Build 2.4.5/ Feb 17, 2017      Run Date:Fri Feb 24 15:45:58 2017
# column      1      2      3      4      5      6      7      8      9      10
#      Time      flux      flux      flux      flux      flux      flux      surf_temp_inner surf_temp_outer total
#      (seconds) (J/s) (J/s) (J/s) (J/s) (J/s) (J/s) (K) (K) (J/s)
#      (none) bound_id_1 bound_id_7 bound_id_8 bound_id_11 bound_id_12 bound_id_17 bound_id_17 bound_id_17 (None)
9.9980246e-02 -4.7113879e+01 0.0000000e+00 0.0000000e+00 0.0000000e+00 0.0000000e+00 4.7101224e+01 5.7393919e+02 5.7393919e+02 -1.2655049e-02
1.5001719e-01 -4.7113879e+01 0.0000000e+00 0.0000000e+00 0.0000000e+00 0.0000000e+00 4.7089331e+01 6.4612091e+02 6.4612091e+02 -2.4548094e-02
2.0002465e-01 -4.7113879e+01 0.0000000e+00 0.0000000e+00 0.0000000e+00 0.0000000e+00 4.7086120e+01 6.7322528e+02 6.7322528e+02 -2.7759467e-02
2.4997013e-01 -4.7113879e+01 0.0000000e+00 0.0000000e+00 0.0000000e+00 0.0000000e+00 4.7084820e+01 6.8149717e+02 6.8149717e+02 -2.9059656e-02
3.0003072e-01 -4.7113879e+01 0.0000000e+00 0.0000000e+00 0.0000000e+00 0.0000000e+00 4.7084434e+01 6.8411177e+02 6.8411177e+02 -2.9445803e-02
3.4997974e-01 -4.7113879e+01 0.0000000e+00 0.0000000e+00 0.0000000e+00 0.0000000e+00 4.7084262e+01 6.8493809e+02 6.8493809e+02 -2.9617637e-02
3.9999510e-01 -4.7113879e+01 0.0000000e+00 0.0000000e+00 0.0000000e+00 0.0000000e+00 4.7084399e+01 6.8519960e+02 6.8519960e+02 -2.9480026e-02
4.5000800e-01 -4.7113879e+01 0.0000000e+00 0.0000000e+00 0.0000000e+00 0.0000000e+00 4.7085493e+01 6.8529226e+02 6.8529226e+02 -2.8386409e-02
5.0001924e-01 -4.7113879e+01 0.0000000e+00 0.0000000e+00 0.0000000e+00 0.0000000e+00 4.7085987e+01 6.8532088e+02 6.8532088e+02 -2.7891996e-02
```

后处理(3/3)



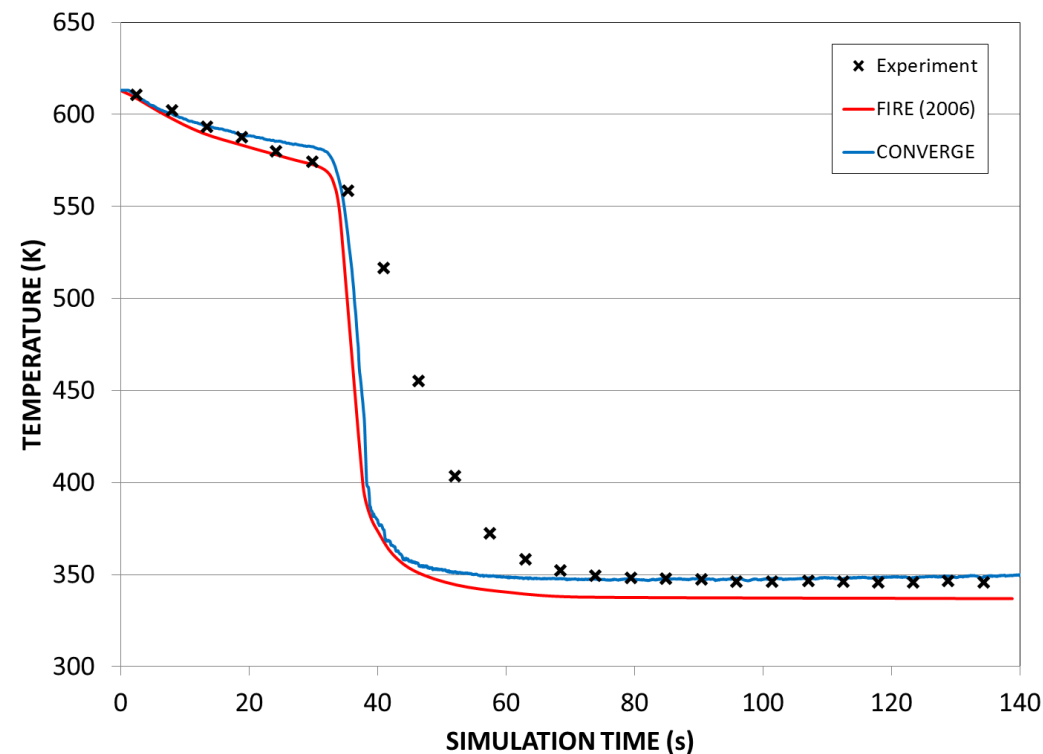
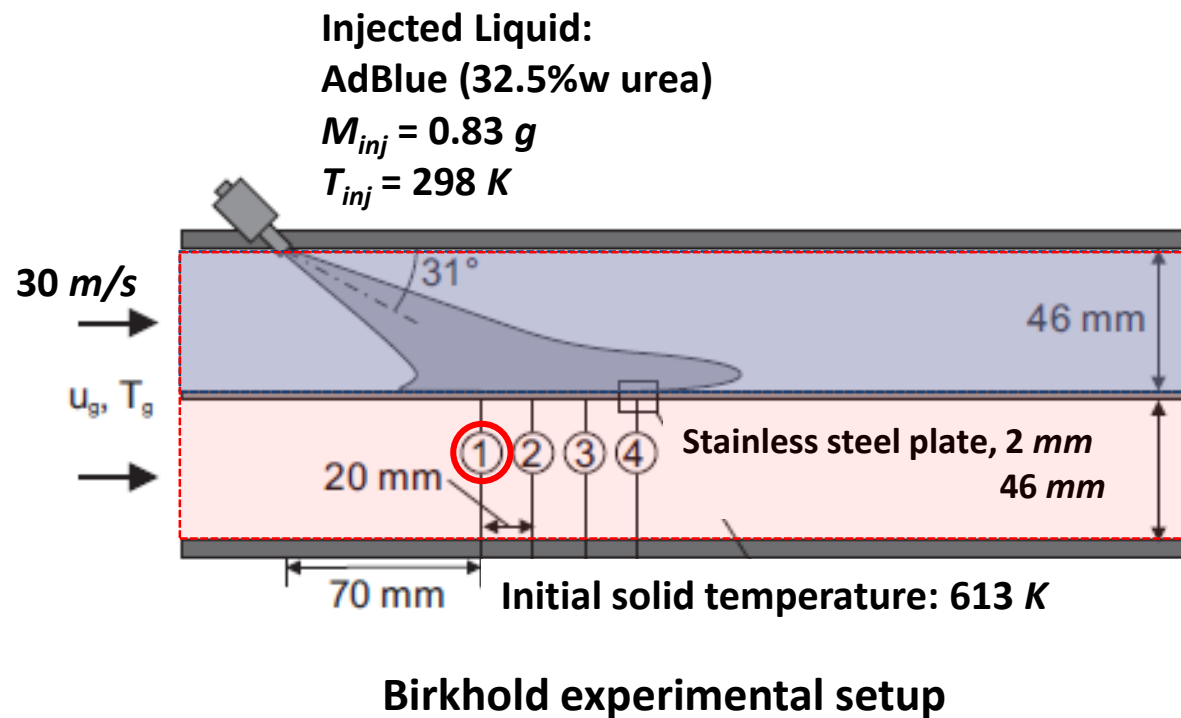
Gasoline engine head: 表面温度*

* Note: 对固体表面采用boundary temperature着色, 而非fluid temperature



水套: 表面 HTC 和 flux

案例：尾气处理 – Birkhold 尿素沉积平板实验



Results comparing experiment to simulation

案例：燃烧器壁温

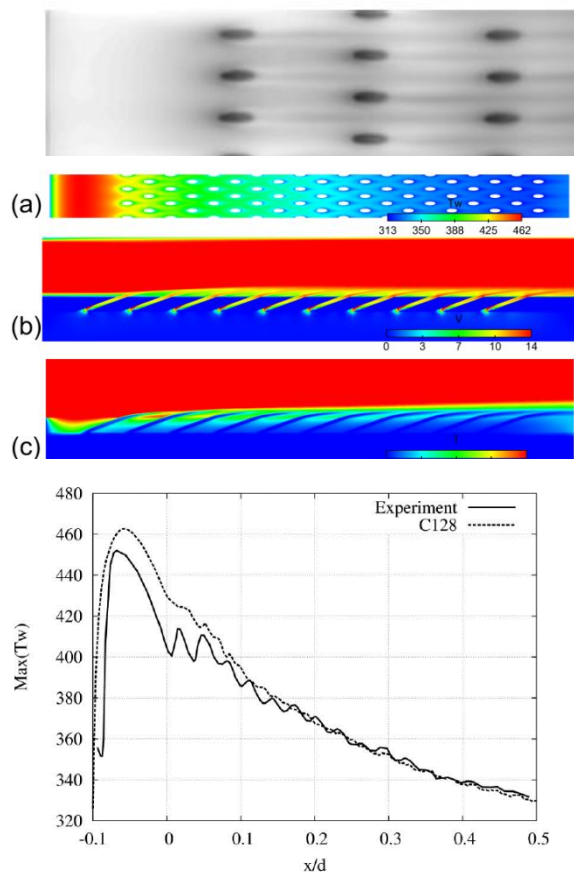
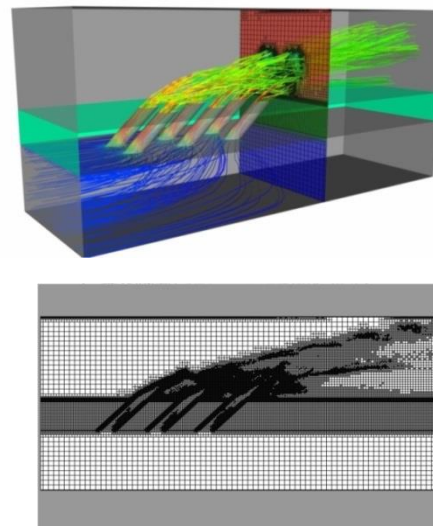
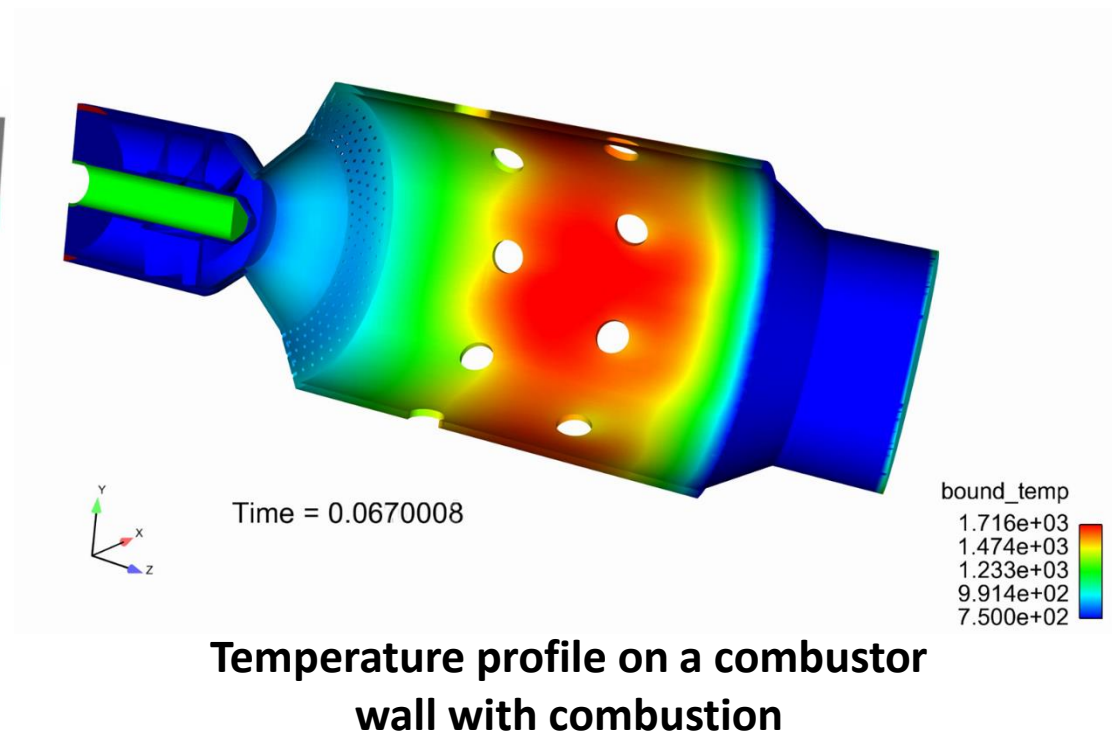


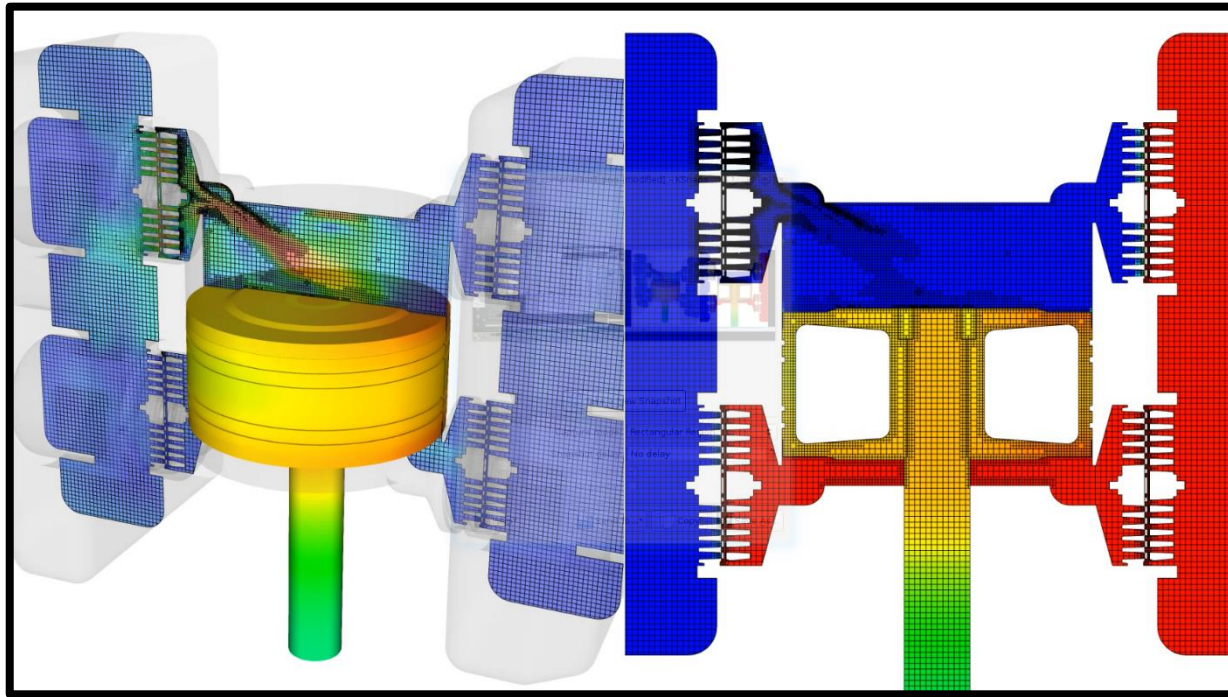
Figure 11. C128-Maximum wall temperature at a stream-wise station vs. stream-wise distance (x) for experimental and URANS-CHT results.



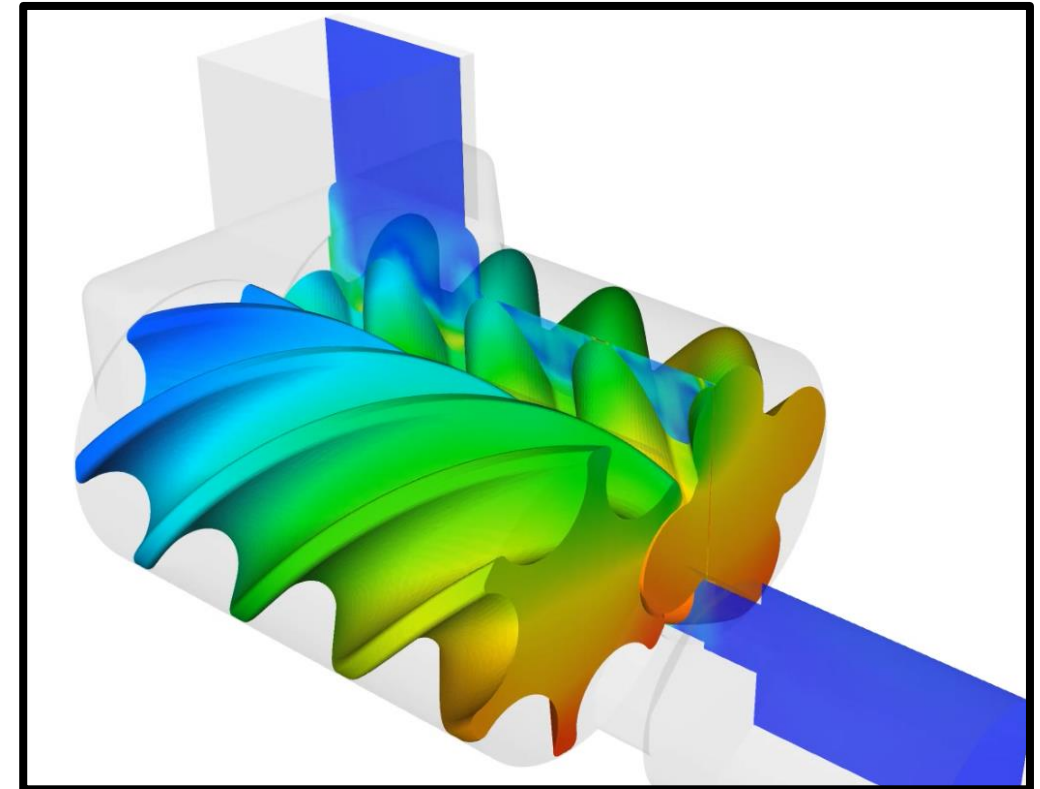
AIAA-2015-3740



案例: 压缩机



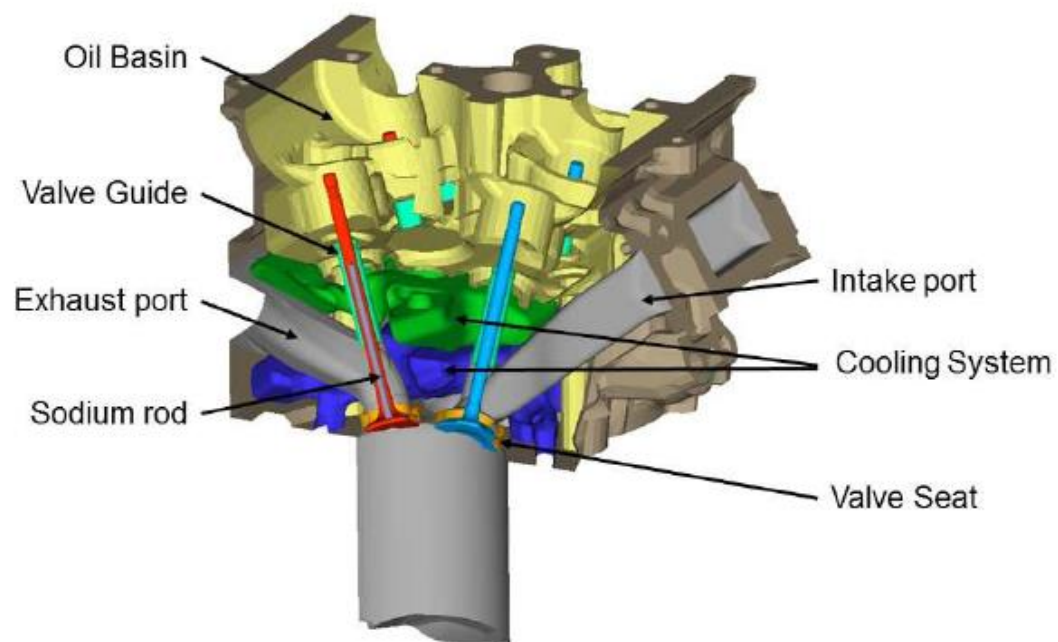
双动式压缩机温度云图



螺杆压缩机固体温度云图

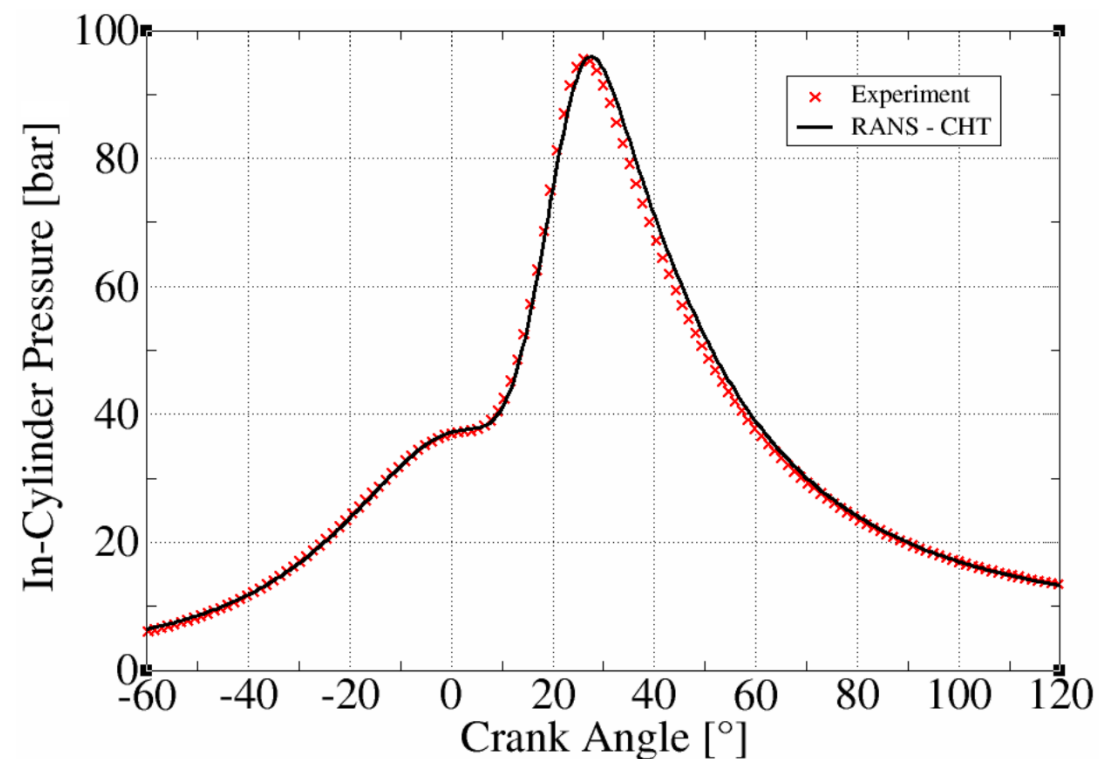
案例: 汽油机缸盖 (1/2)

CHT计算模型



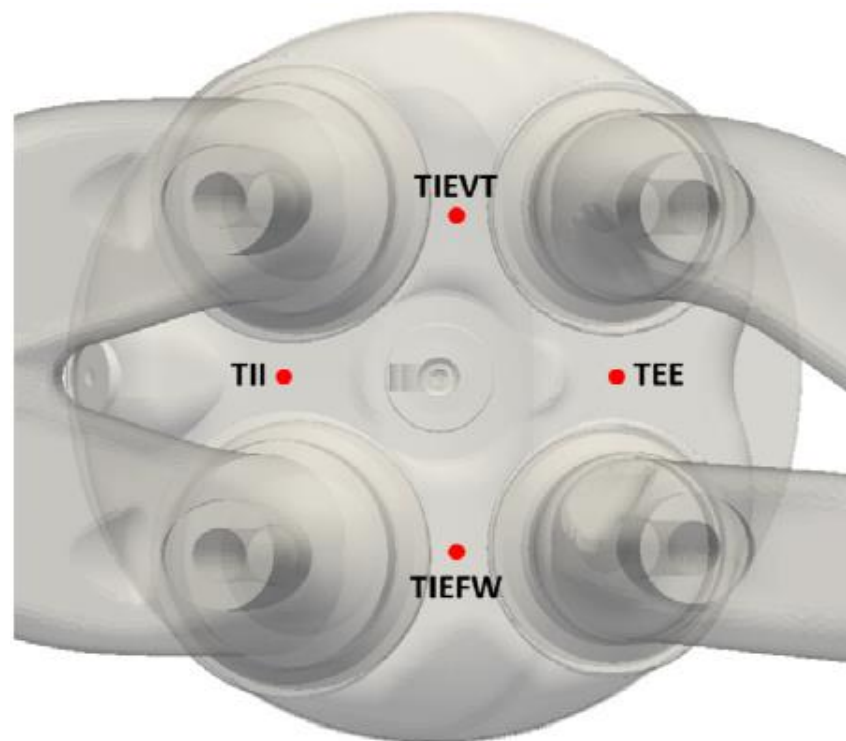
Ravet & LeGuille, Renault Nissan, 2017 CONVERGE UC

燃烧计算采样ECFM



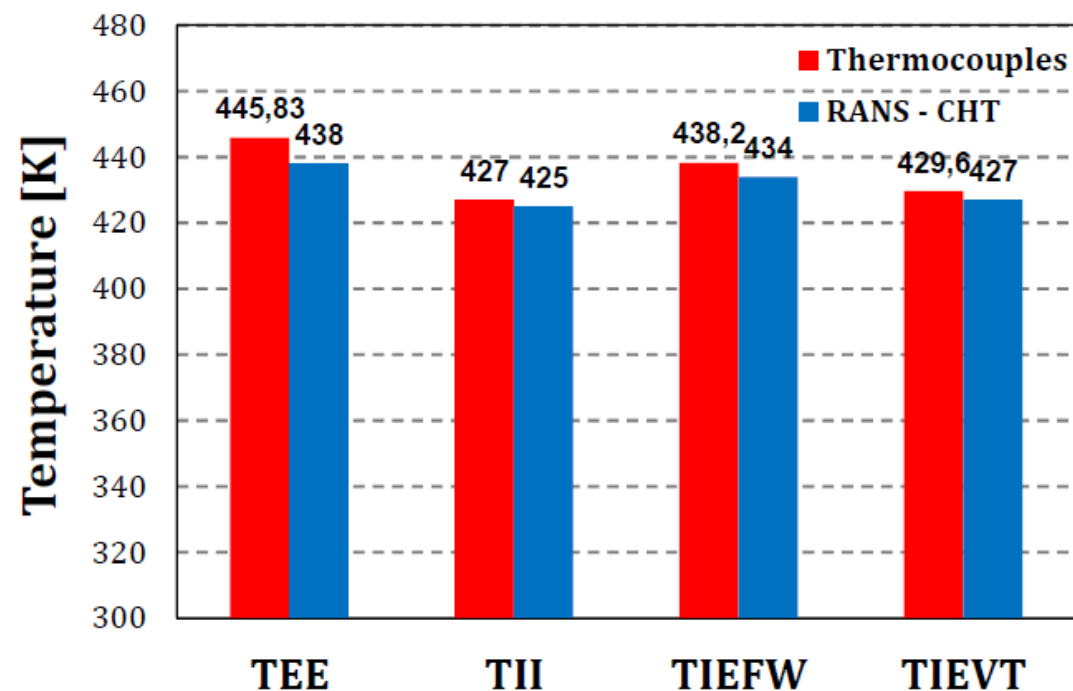
案例: 汽油机缸盖(2/2)

热电偶位置(experimental)



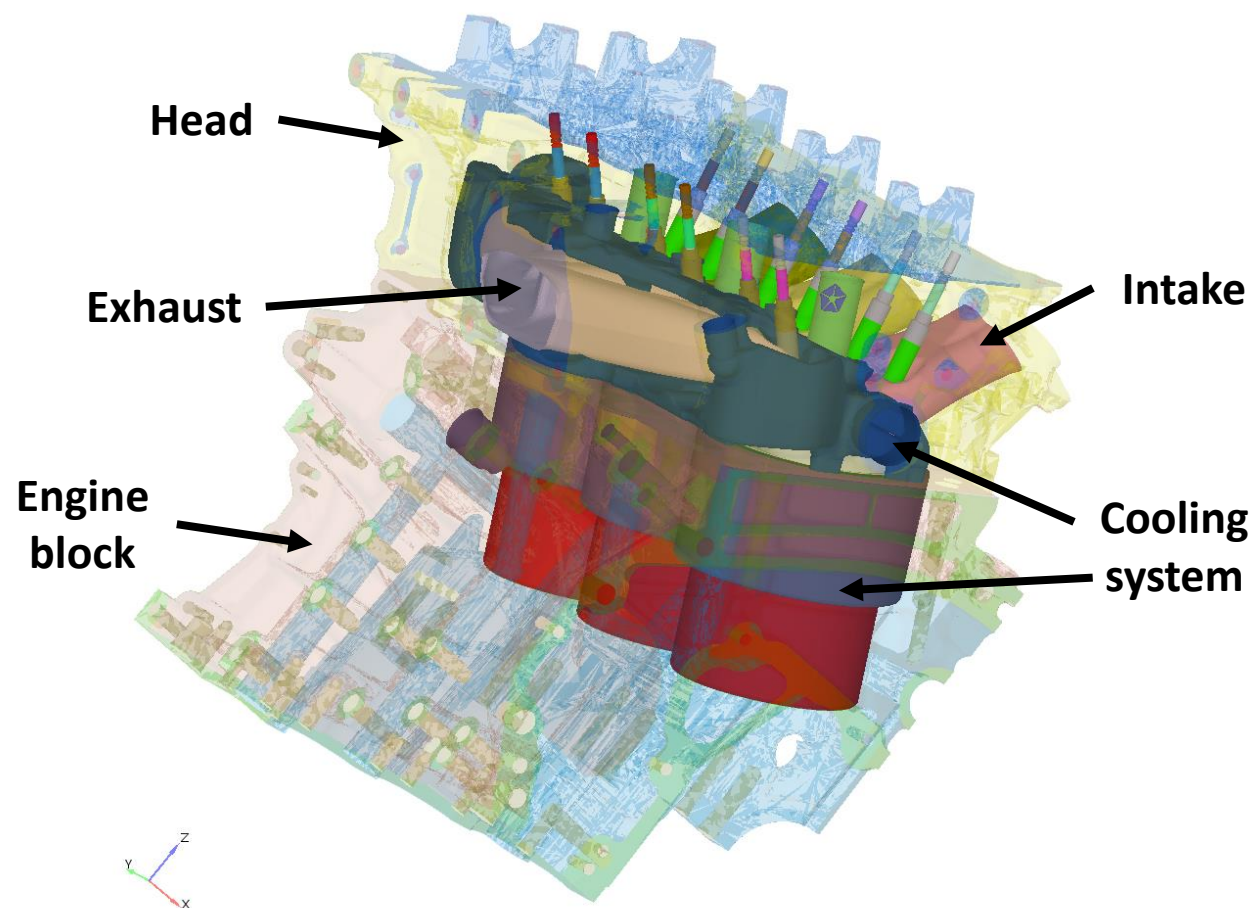
Ravet & LeGuille, Renault Nissan, 2017 CONVERGE UC

RANS+CHT 预测的缸盖温度与实验结果吻合良好



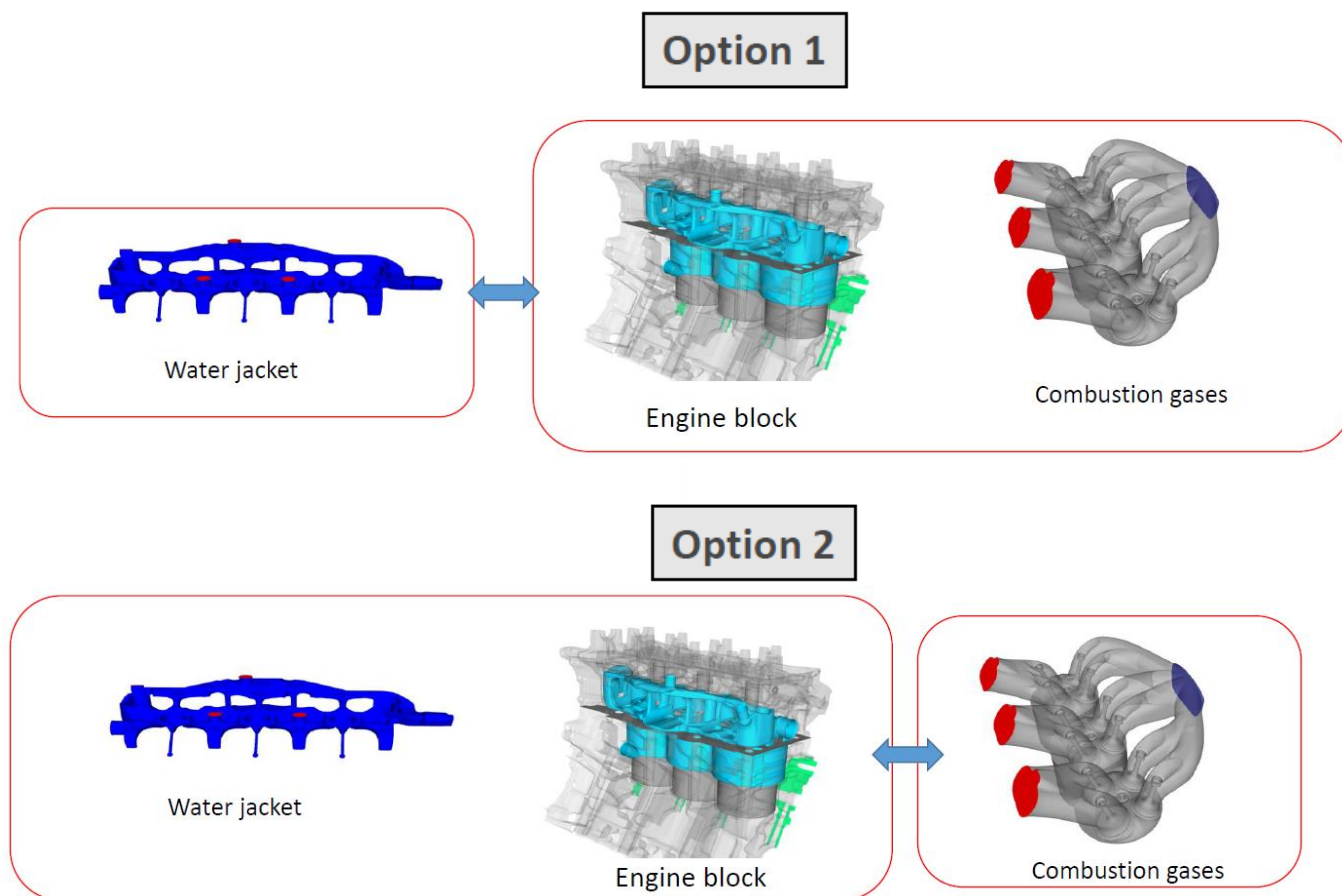
案例: V6 发动机 (1/3)

- 该案例分析目标是预测金属温度
- 包含三个子系统
 - 冷却系统(水套)
 - Engine block
 - 缸内燃烧气



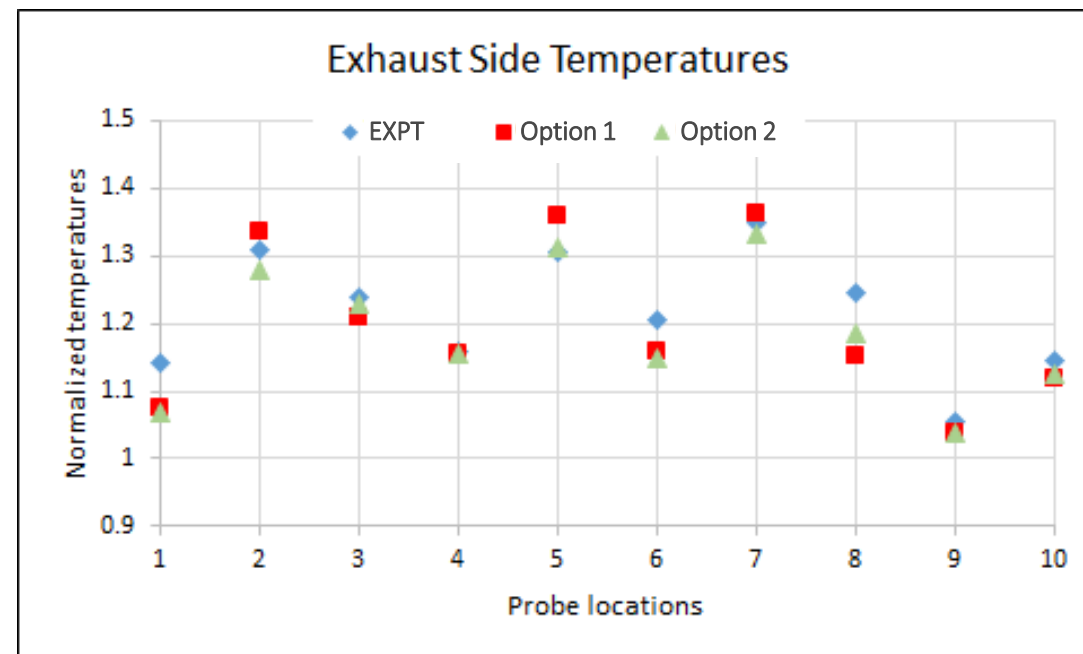
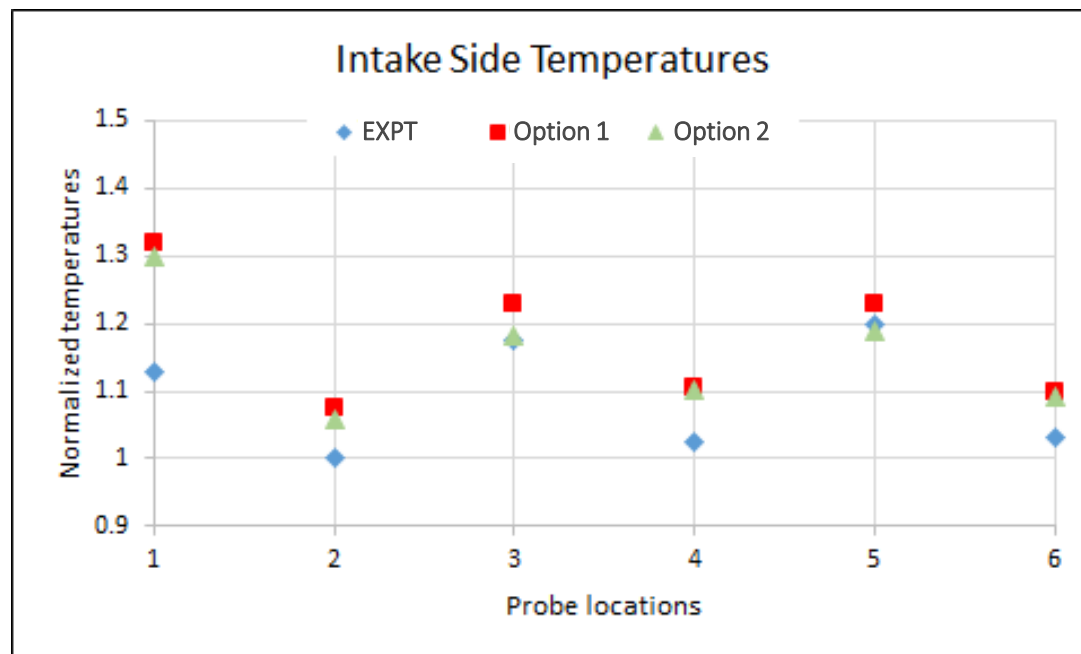
案例: V6 发动机(2/3)

- 对三个子系统构造两个模型进行耦合计算 (option 1 或 2)
- 对水套模型开启核态沸腾模型(nucleate boiling model)实现热流精确捕捉
- 开启super-cycling减少计算量



案例: V6 发动机(3/3)

- 两种方案预测的金属温度均与热电偶实测值吻合良好

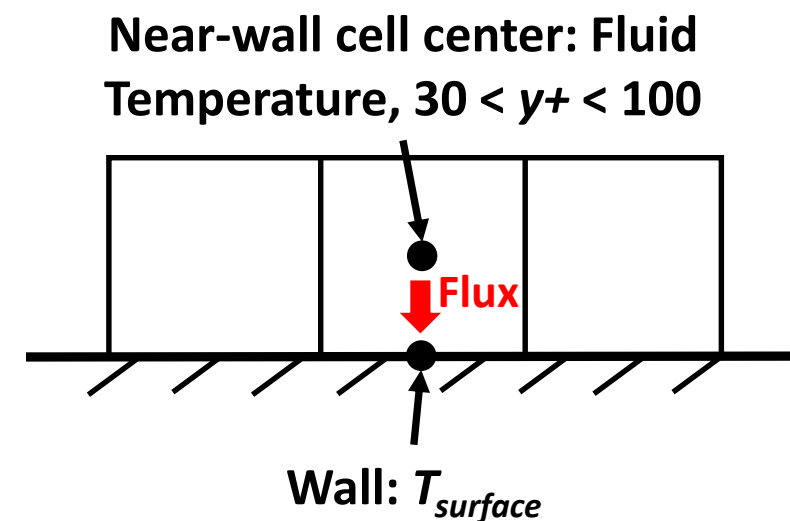


提纲

- ◆ 背景
- ◆ 三种CHT方法
- ◆ 三维直接耦合CHT方法介绍及案例演示
- ◆ 其它相关专题介绍
- ◆ 一维CHT介绍
- ◆ 附录

Heat Transfer Coefficient 定义

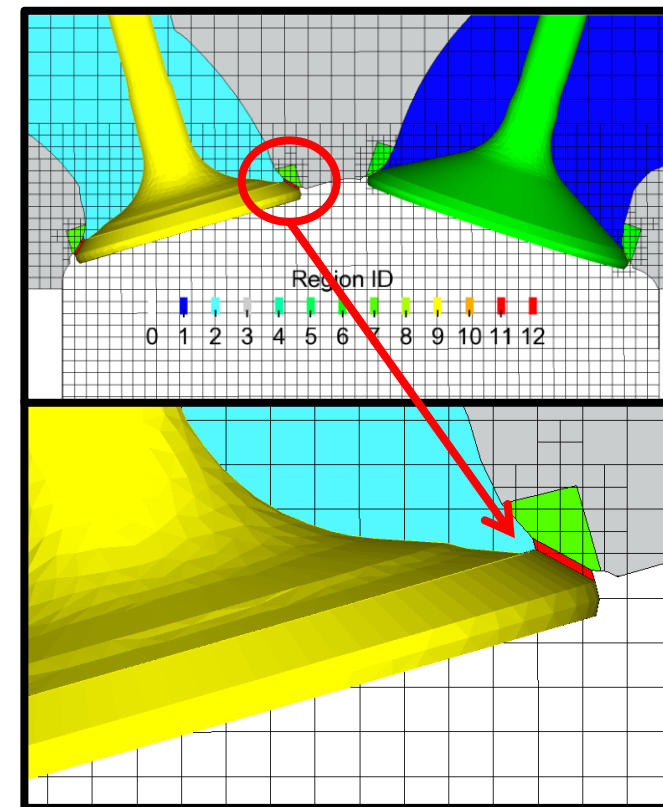
- 为了后处理需要, CONVERGE会基于heat flux和local temperature gradient计算HTC
- 因此这个HTC是基于近壁单元温度的local HTC
 - 与基于用户指定参考温度的HTC (通常文献中使用)不同。
 - 两者不能直接比较
 - Local HTC依赖于近壁网格尺寸



$$HTC = \frac{\text{heat flux}}{T_{near-wall cell temp} - T_{surface}}$$

INTERFACE: Contact Region (1/5)

- 由于CONVERGE中面网格不能相互接触，否则可能被识别为intersection, 因此相互接触的固体间需要保持一个小的间隙。
 - 比如，气门需要保持一个小的开度(minimum lift)
- CONVERGE允许用户将此间隙定义为一个contact region。



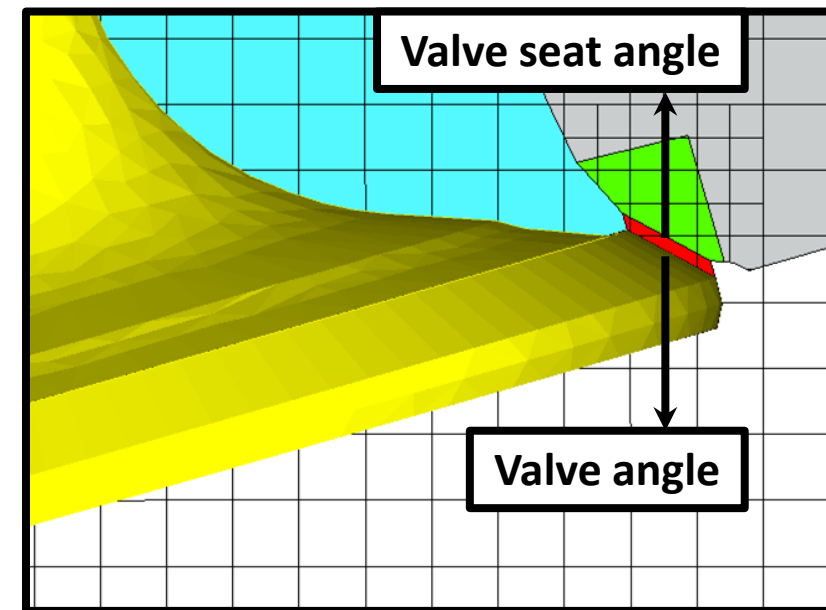
Define each contact region (red region in the above image) as a separate region

INTERFACE: Contact Region (2/5)

- **contact region** 需要被初始化为**fluid**域
 - 对气门而言，气门间隙处的**contact region** 初始条件应与**port**域保持一致。
- 对每个固-固接触部位需要定义一个单独的**contact region**(例如有两个进气门，需要定义两个**contact region**)
- 定义**contact region**时，确保包围的边界都是**interface**类型
 - 对于气门，推荐采用 **valve angle** 和 **valve seat angle** 来定义**contact region**

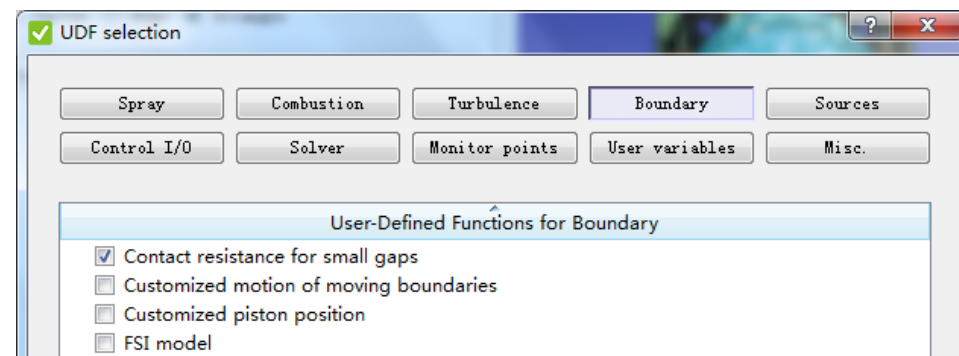
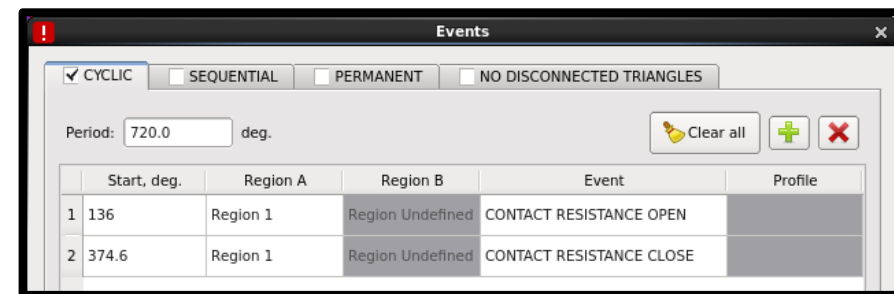
INTERFACE: Contact Region (3/5)

- 气门间隙Contact region定义方法:
 - Valve seat angle: 阀座侧接触面
 - Interface seat (绿色region)/contact region (红色 region)
 - Valve angle: 阀体侧接触面
 - Interface valve (绿色region)/contact region (红色 region)
- 注意: 用户无需定义 contact region与port region (蓝色region)的interface或 contract region与cylinder region (白色region)直接的interface
 - 当设置好 CONTACT RESISTANCE events 时, CONVERGE 会自动创建此处的interface



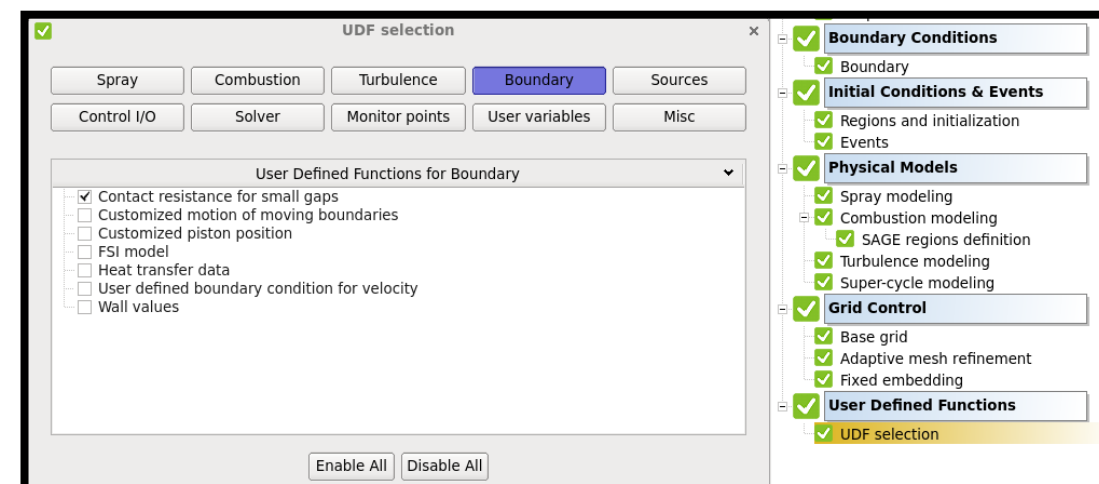
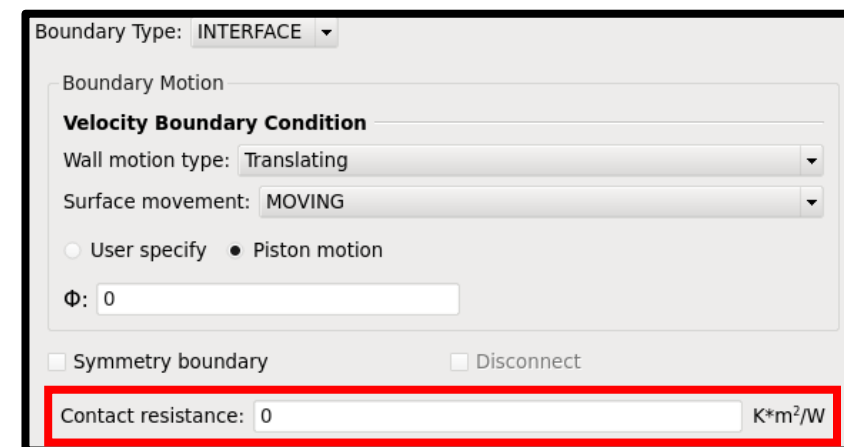
INTERFACE: Contact Region (4/5)

- 完成region定义后，设置 CONTACT RESISTANCE events (*Case Setup > Initialization & Events > Events*)
 - CONTACT RESISTANCE OPEN event 运行流体流经 contact region (类似OPEN event)
 - CONTACT RESISTANCE CLOSE event 限制流体流经 (只允许导热发生)
- 注意：CONTACT RESISTANCE event需要配合udf使用 (*Case Setup > Advanced Parameters > UDF Selection > Boundary*)



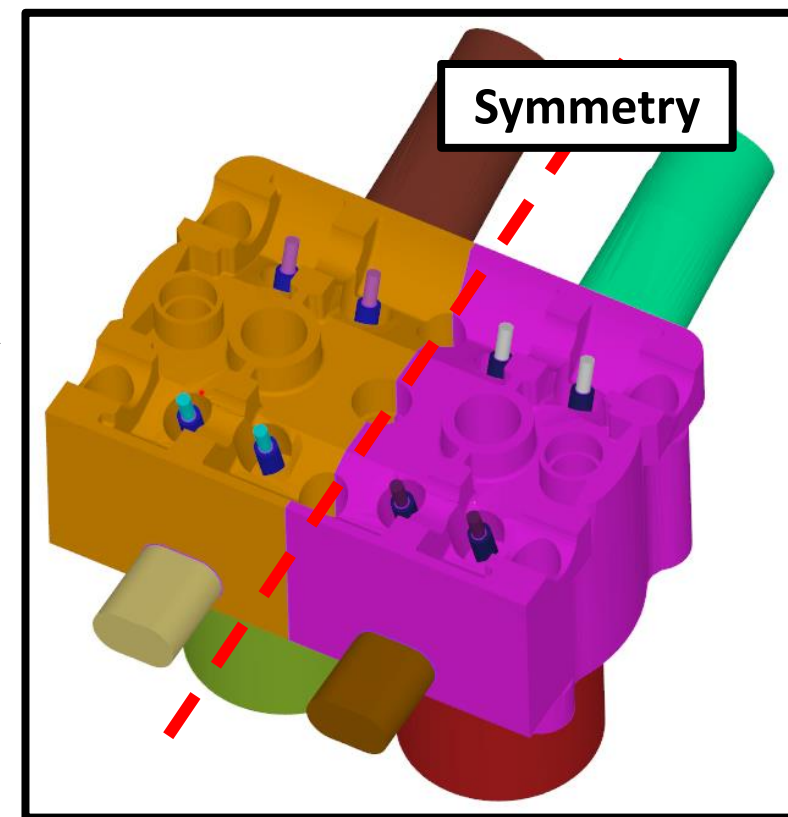
INTERFACE: Contact Region (4/4)

- 当CONTACT RESISTANCE CLOSE event发生时
 - 这两个interface的固体侧耦合起来计算，并且这两个边界之间只允许导热发生
 - CONVERGE忽略（不求解）contact region的流体方程
 - 用户还可指定一个接触热阻 $R''_{t,c}$
- 在2.3中，接触热阻需要通过udf设定，2.4中可以直接在边界条件定义面板设置接触热阻



Heat Transfer Mapping with Super-Cycling (1/6)

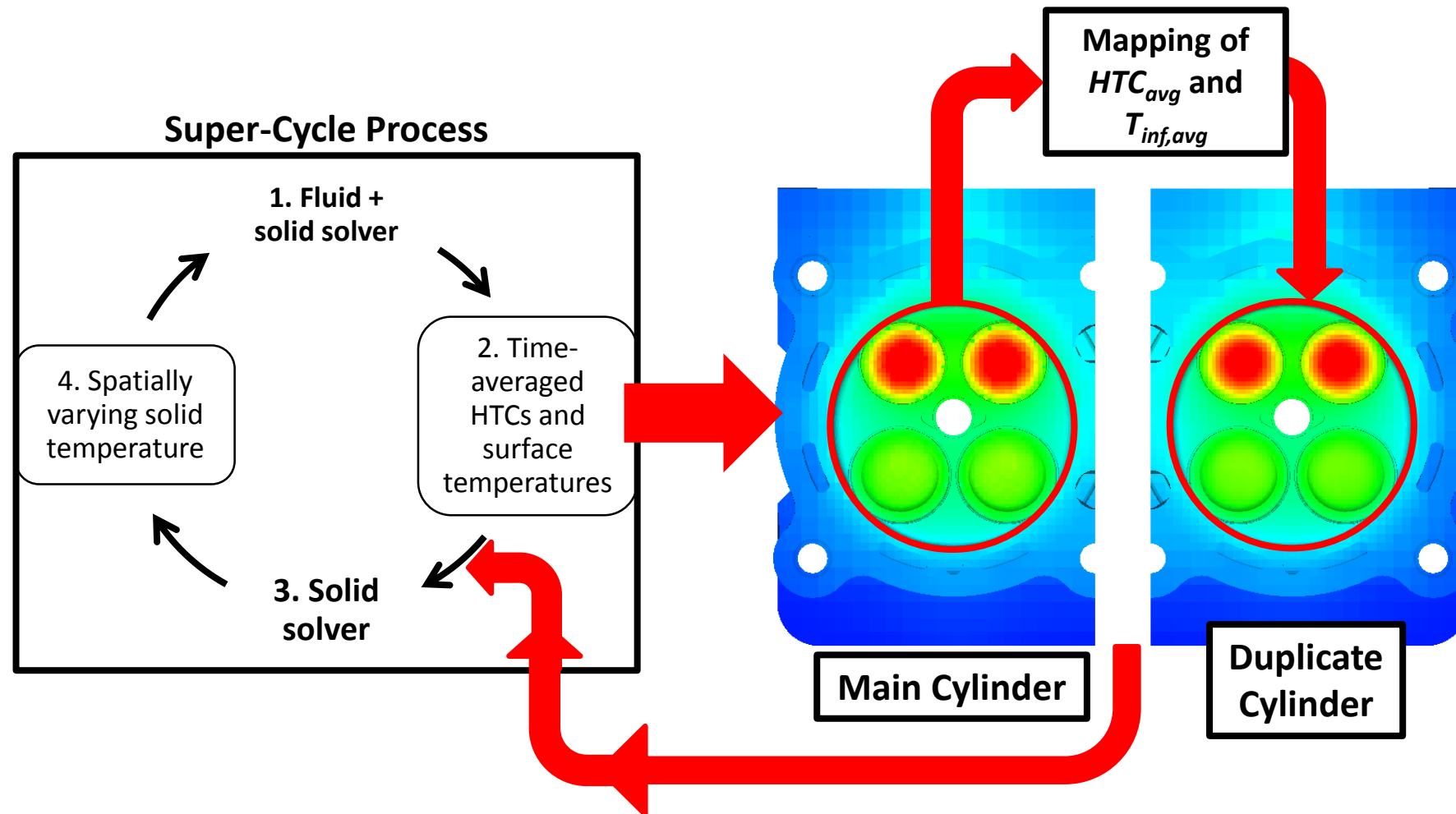
- 带固体的多缸CHT模型计算量非常巨大
- 多缸CHT模型传热映射功能可以利用多缸的对称性或周期性有效减少计算量。
- 用户只需设定一个缸(main cylinder)进行燃烧计算
 - CONVERGE将main cylinder的HTC和气膜温度映射到其它缸，从而实现整个发动机固体温度的精准预测



Heat Transfer Mapping with Super-Cycling (2/6)

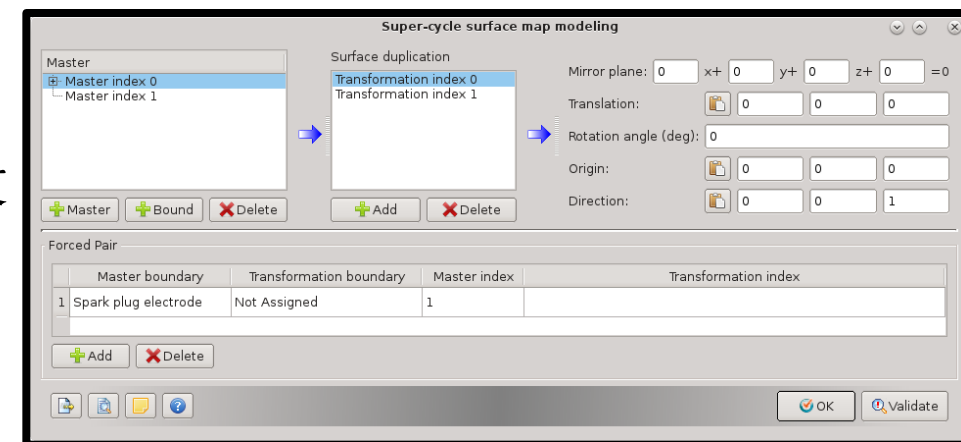
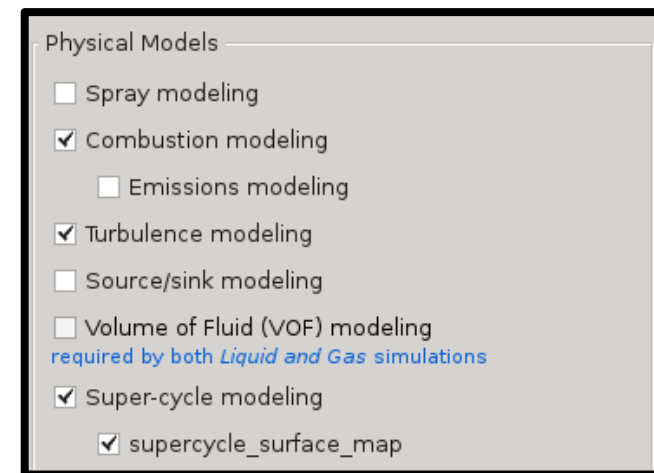
- 多缸CHT模型传热映射功能需要与super-cycling 功能一起使用
- 该功能可以将传热信息映射到流-固interface或固体壁面
- 在每个super-cycle中， CONVERGE对main cylinder的流-固interface的HTC和气膜温度做平均， 然后映射到各缸对应边界
 - 用户需要定义main cylinder边界和duplicate cylinder边界之间的几何转换关系

Heat Transfer Mapping with Super-Cycling (3/6)



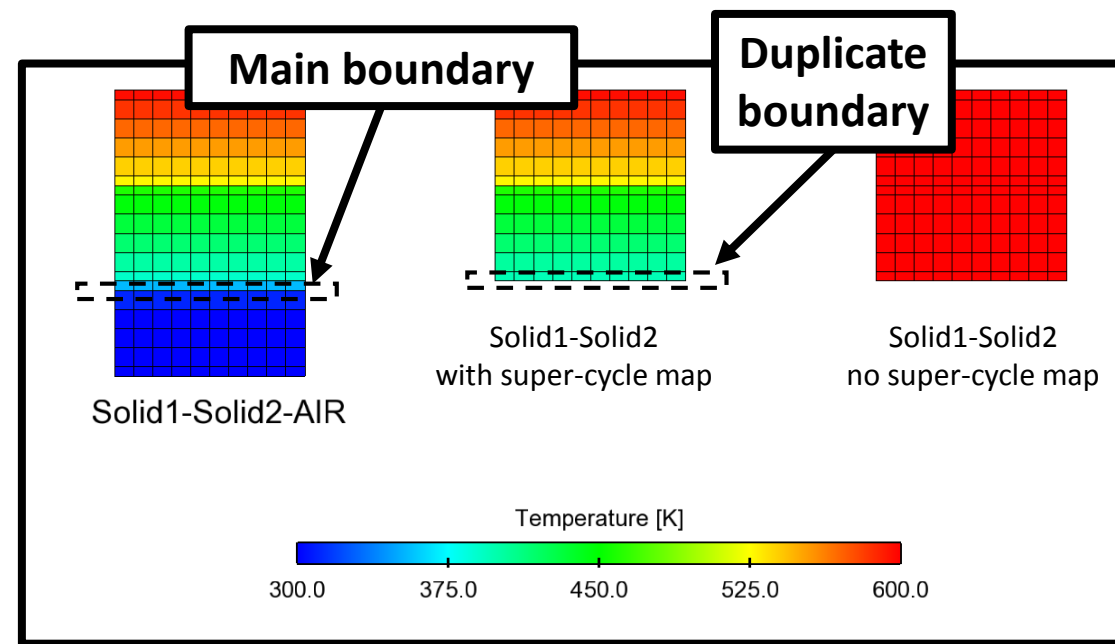
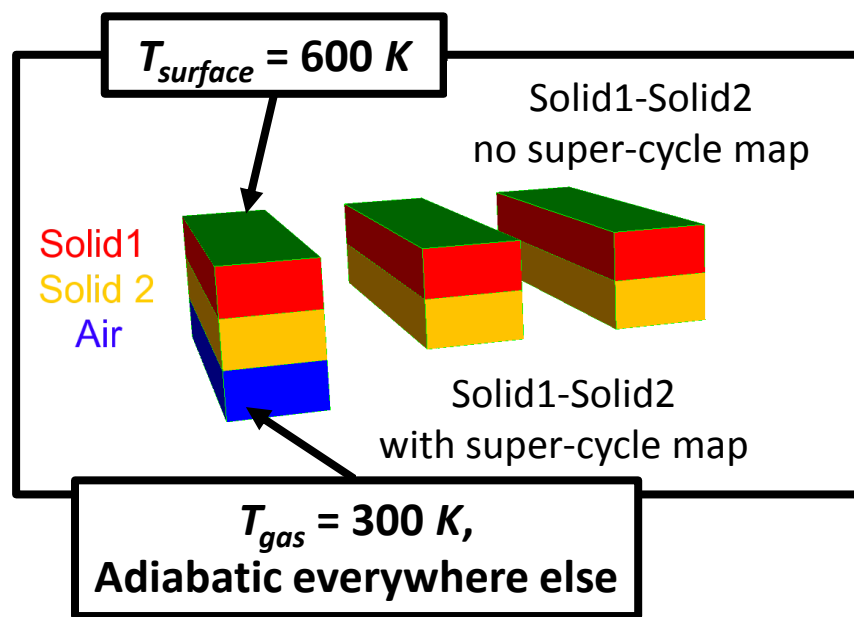
Heat Transfer Mapping with Super-Cycling (4/6)

- 在 *Case Setup > Physical Models* 中激活 supercycle surface map
- 在 *Super-cycle surface map modeling* 面板中定义 main/duplicate cylinders, mapped boundaries, 及几何转换信息
- 用户可以映射以下两类边界
 - Fluid-solid INTERFACE
 - Solid WALL (duplicate boundary 的温度边界需要设为 *Neumann*)
- 附录提供了一个 *supercycle_surface_map.in* 文件范例



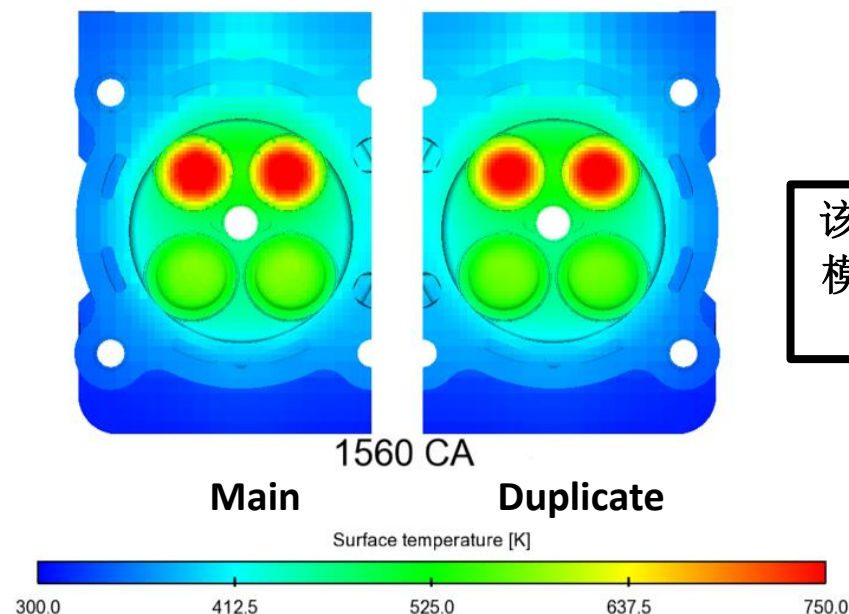
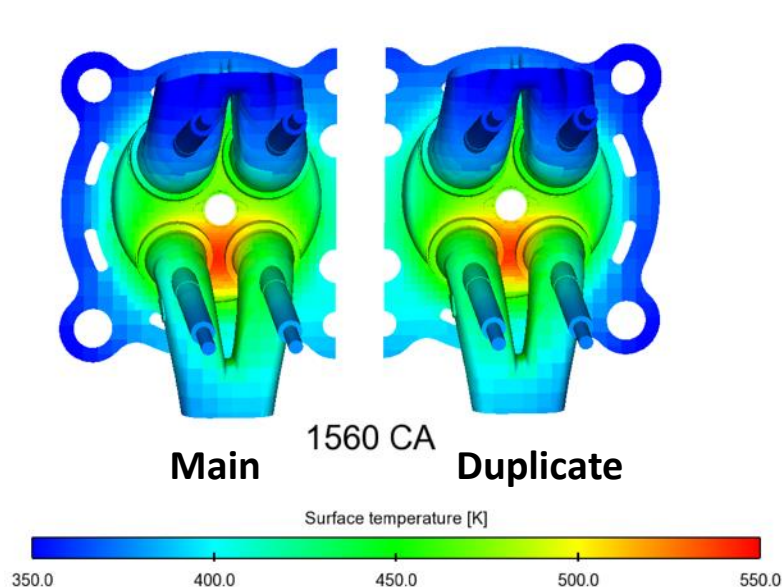
Heat Transfer Mapping with Super-Cycling (5/6)

- Test case #1: Fluid-solid interface 映射到solid surface
 - 双层固体强制对流冷却模型
 - 三个几何在同一个CVG模型中



Heat Transfer Mapping with Super-Cycling (6/6)

- Test case #2: Fluid-solid interface 映射到fluid-solid interface
 - 两缸模型
 - 将main cylinder的所有fluid-solid interfaces 映射到duplicate cylinder的对应边界



该模型采用SAGE燃烧模型进行了三个循环的计算

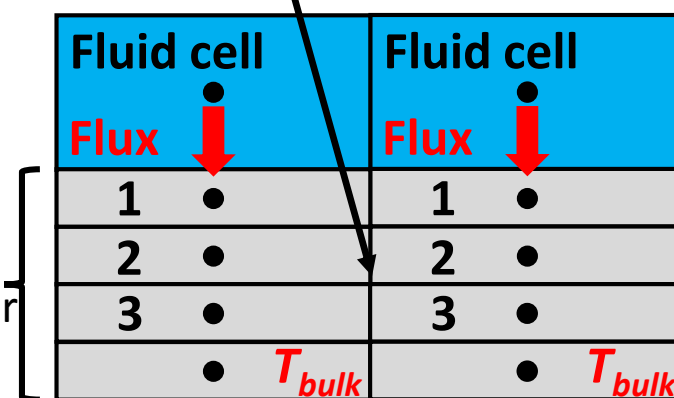
提纲

- ◆ 背景
- ◆ 三种CHT方法
- ◆ 三维直接耦合CHT方法介绍及案例演示
- ◆ 其它相关专题介绍
- ◆ 一维CHT介绍
- ◆ 附录

1D CHT (1/3)

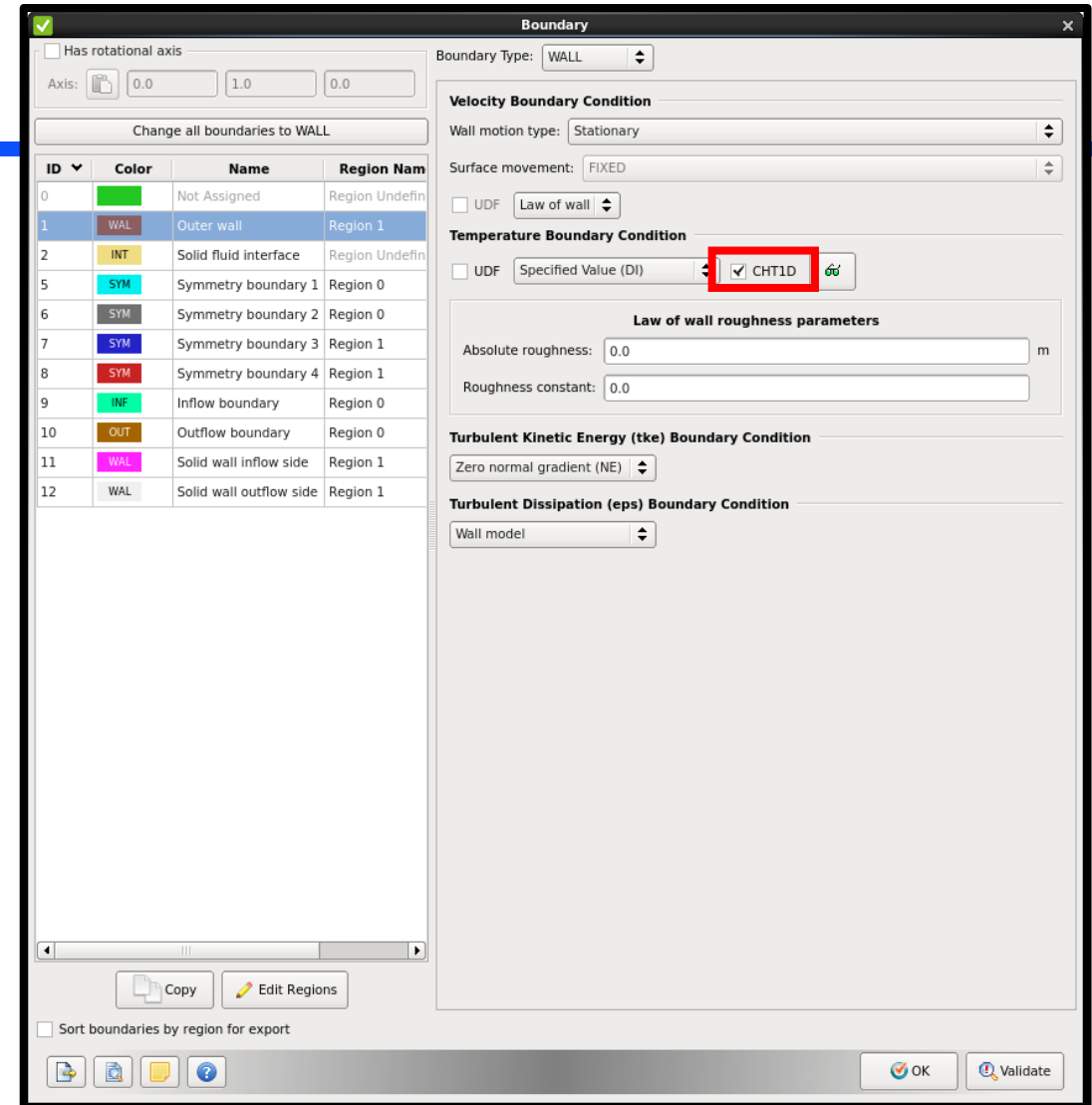
- 该模型可以求解沿壁面法线方向的温度变化，并可获得随转角变化的可靠结果。
- 该模型适用于热穿透深度较浅的流固传热（如高热阻的固体）
- CONVERGE将solid wall处理成固体薄层，并将其划分为多个子层(sub-layer)，无需划分体网格
 - 每个sub-layer代表一层固体导热计算网格n
- 该模型的边界条件包括：
 - 来自流体侧的热流条件 (由CONVERGE计算得到)
 - 用户指定的bulk temperature (T_{bulk})

不考虑与壁面平行方向的导热



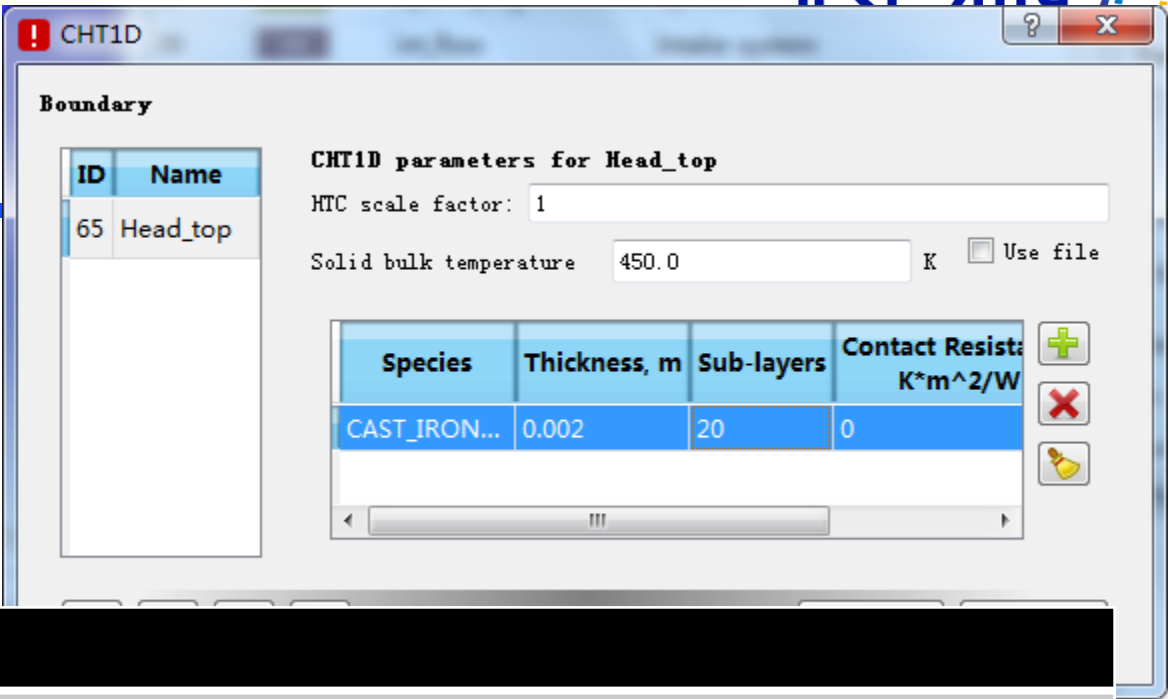
1D CHT (2/3)

- 设置方法: 在 *Case Setup > Boundary Conditions > Boundary* 中, 选择需要设置一维导热的边界, 并勾选 *Temperature Boundary Condition* 下的 CHT1D
- 启用CHT1D后, 只能选用 *Law of wall* 或 *DI temperature boundary conditions*



1D CHT (3/3)

- *CHT-1D* 面板包含以下参数

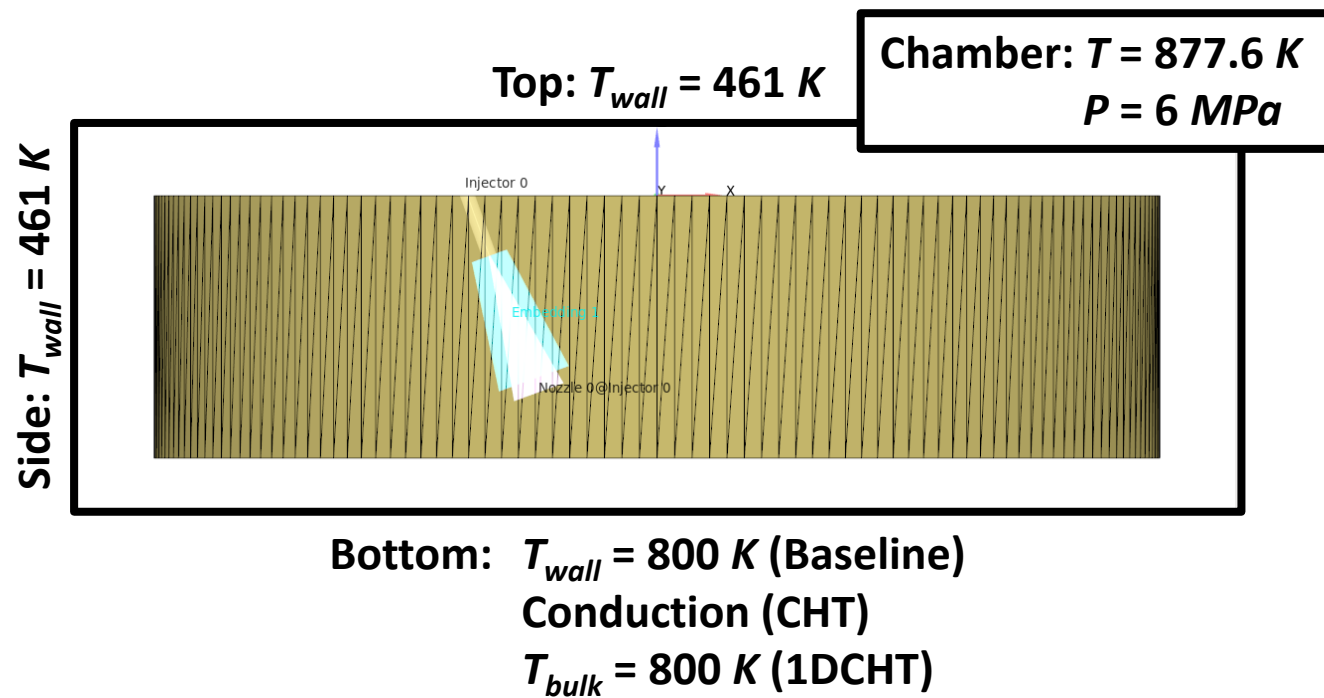


Field/Parameter	Description
HTC scale Factor	流固间传热系数缩放因子. 默认为0 (直接使用CVG计算的传热系数，不作调整)
Number of solid layers	流体域与bulk solid之间的固体薄层数
Solid layer species	固体薄层的材料构成
Thickness	固体薄层的深度，单位为 m (通常为1 - 2 mm)
Number of sub-layers	将固体薄层划分的子层数，作为计算网格， (通常设为 20)
Contact resistance	层与层间的接触热阻. 默认值为 0
Solid bulk temperature	T_{bulk}

1D CHT:验证案例 (1/3)

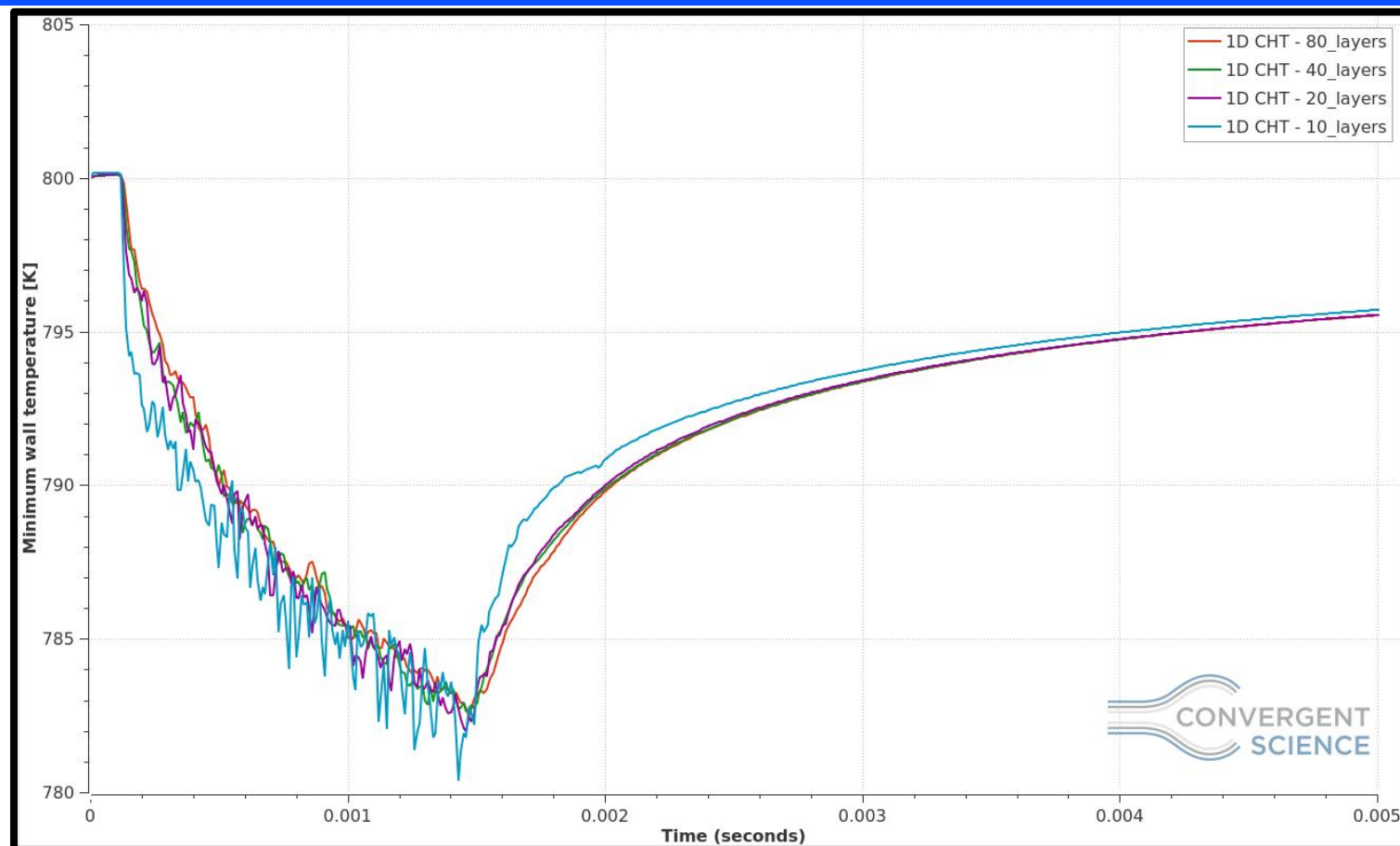
- 测试模型: 圆柱定容腔内的固体壁面喷雾冲击射流冷却模型
 - 喷射C12H26 3.46 *mg* , 持续1.54 *ms* (不考虑液膜形成)

Case Number	Name	Description
Case 1	Baseline	Bottom wall at a fixed temperature of 800 K
Case 2	CHT	1 mm thick aluminum solid with 3D CHT calculation
Case 3	1DCHT	Baseline with 1D CHT at the bottom wall



1D CHT:验证案例 (2/3)

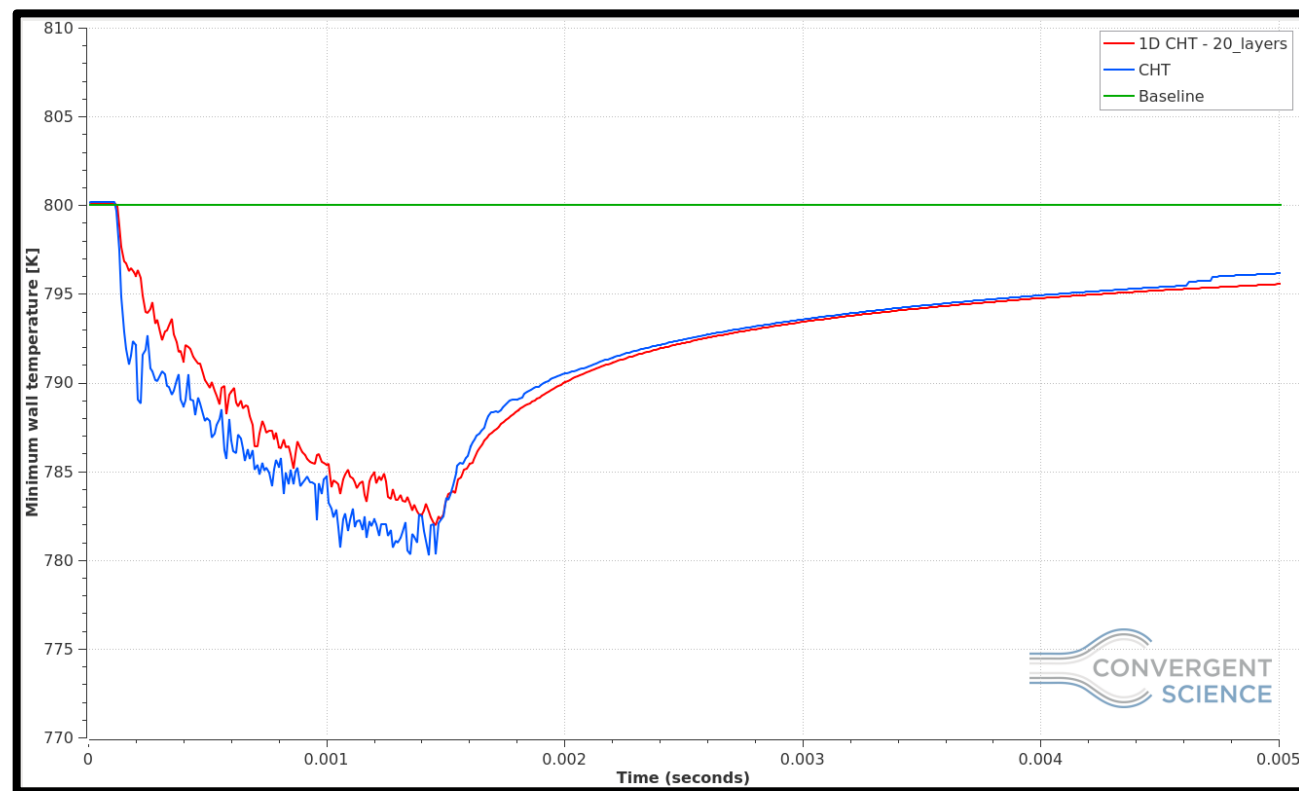
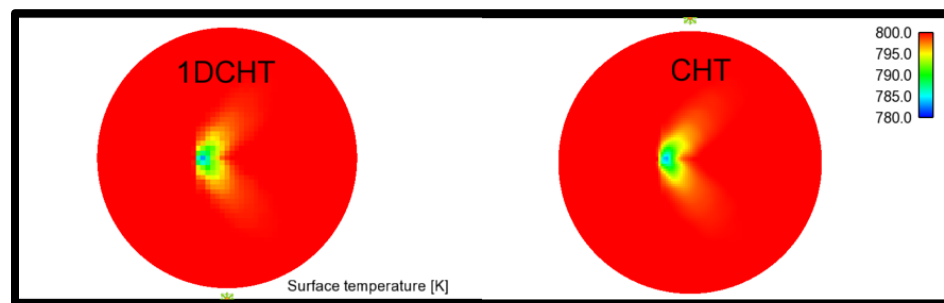
- 图中曲线显示底部壁面上的最小温度，表征喷雾射流的冷却作用
- 结果表明：20个sub-layer时温度趋向一致



Effect of number of sub-layers on convergence

1D CHT: 验证案例 (3/3)

- 3DCHT和1DCHT直接的差别非常小
- Baseline 与 1DCHT 模型计算时间相当，而3DCHT模型计算时间要长得多



提纲

- ◆ 背景
- ◆ 三种CHT方法
- ◆ 三维直接耦合CHT方法介绍及案例演示
- ◆ 其它相关专题介绍
- ◆ 一维CHT介绍
- ◆ 附录

传热模拟推荐设置(1/3)

- *Solver.in*: 能量方程的求解精度应该设为二阶
 - 一阶精度可能会高估传热
 - 二阶精度设置 $fv_upwind-factor_global = 0.5$

传热模拟推荐设置(2/3)

- *Turbulence.in*: heat transfer model推荐使用 O'Rourke and Amsden 或 Angelberger (*heatmodel* = 0 or 2)
 - Han and Reitz model (*heatmodel* = 1)可能会高估传热量
 - 另外，用户也可以将*heatmodel* 设为 10, 11, or 12 (在原一位整数的*heatmodel*设置基础上加10)，强制求解器使用constant wall distance
 - *heatmodel* = 10, 11, or 12时，求解器在计算wall distance时认为近壁网格尺寸等于full cell体积%60对应的网格尺寸
 - 这样可阻止local cut或cell pairing 引起的wall distance变化，幅度在[30%,130%]间
 - 合理设置壁面附近网格尺寸，使得 y^+ 在推荐的[30,100]范围 (不过根据以往结果，即使 y^+ 属于[100,300], 传热量也没有显著变化)
 - It is know that the flux is over-predicted if the resolution is too fine by the wall $y^+ < 30$

Heat Transfer Modeling Recommendations (3/3)

- *Turbulence.in*: Near-wall treatment

Near Wall Treatment	Requirements	y^+ Range	Description
Law-of-wall	• Available for all RANS models • Set the WALL velocity boundary condition to Law-of-wall • For $k-\omega$, set the near wall function to standard wall function (log-law) for ω	$30 \leq y^+ \leq 100$	• Uses the law-of-the-wall assumption for velocity in the log-law region (assumes the cell adjacent to the wall falls in the log-law region)
Automatic wall treatment function	• Available only for $k-\omega$ models	$3 \leq y^+ \leq 300$	• Blends the solution for ω in the viscous sub-layer and the log-law region to calculate the specific dissipation rate at the cell adjacent to the wall
Low Reynolds number	• Available only for $k-\omega$ models • Must set WALL velocity boundary condition to No Slip • Set the WALL TKE boundary condition to Dirichlet	$y^+ \leq 1$	• Resolves the viscous sublayer - Automatic wall treatment: set ω at cell center - Menter: set ω at the boundary wall

Sample *supercycle_surface_map.in*

```

1  tot_num_masters
1  tot_num_slaves
3  tot_num_master_boundaries
##### Master Index 0 #####
3  num_boundaries      Number of boundaries to map for master index
26 bound_id
27 bound_id
28 bound_id
#----- Surface duplication for Master Index 0 -----
1  num_slaves      Number of surface transformation

#Transformation index 0
0 -1.0 0 -0.06  mirror plane

0  trans_x
0  trans_y
0  trans_z
30 rot_angle      counter-clockwise
0.1 0.2 0.3  orig_xyz      origin of the axis
1.4 0.5 0.6  vector_xyz    direction vector

#=====
4  num_forced_pairs
31 279 0 0      forced_pairs  master_bound_id/dup_bound_id/master_index/slave_index
34 274 0 0      forced_pairs  master_bound_id/dup_bound_id/master_index/slave_index
44 290 0 0      forced_pairs  master_bound_id/dup_bound_id/master_index/slave_index
40 287 0 0      forced_pairs  master_bound_id/dup_bound_id/master_index/slave_index

```

Total number of main cylinders, duplicate cylinders, and main boundaries in the simulation

Number of boundaries to use for mapping main cylinder 0 and the boundary IDs of the INTERFACE boundaries used for mapping

Number of duplicate cylinders for main cylinder 0

Transformation information that transforms duplicate boundaries onto the main cylinder 0 boundaries.

If CONVERGE cannot find the duplicate boundary, the pairing can be forced. Provide the boundary ID of the INTERFACE if the duplicate cylinder has solid-fluid interfaces. Provide the boundary ID of the solid wall if the duplicate cylinder has solid walls.