

# GT-SUITE V7.5

## 发动机暖机过程解决方案

所属: IDAJ GT-Team

- 所有公司名,产品名,服务名是各个公司的商标或登记商标以及服务商标。
- 本资料包括保密信息。没有得到敝公司的同意,请不要使用,发布,复制本资料或本电子档。



# 内 容

---

- GT-SUITE在热管理上的应用
  - 重要特性
  - 热管理上的应用
- 发动机暖机模拟说明
- GT-SUITE7.5的解决方案

# GT-SUITE在热管理上的应用

---

## ■ GT-SUITE在热管理上的重要特性

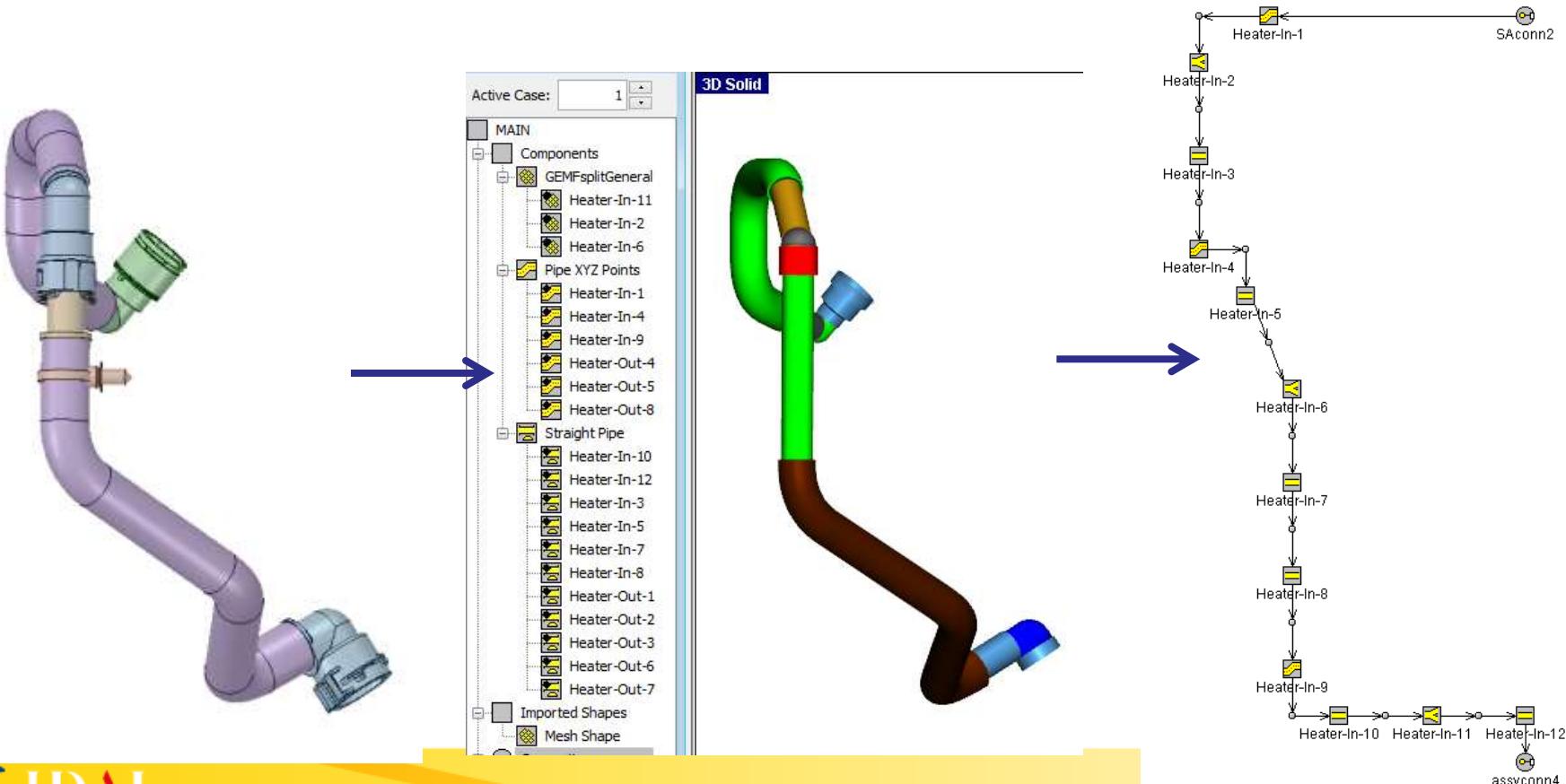
- 三维几何导入
- 流体计算
- 壁温求解
- 散热器特性
- 泵的模拟

## ■ 热管理上的应用内容

# 热管理重要特性：3D CAD转化为1D模型

## ■ 有便捷、准确的3D工具转化工具

- GT-SpaceClaim: 从绝大部分的CAD数据格式抽取内腔功能
- GEM3D: 把3D内腔转化为1D流体部件



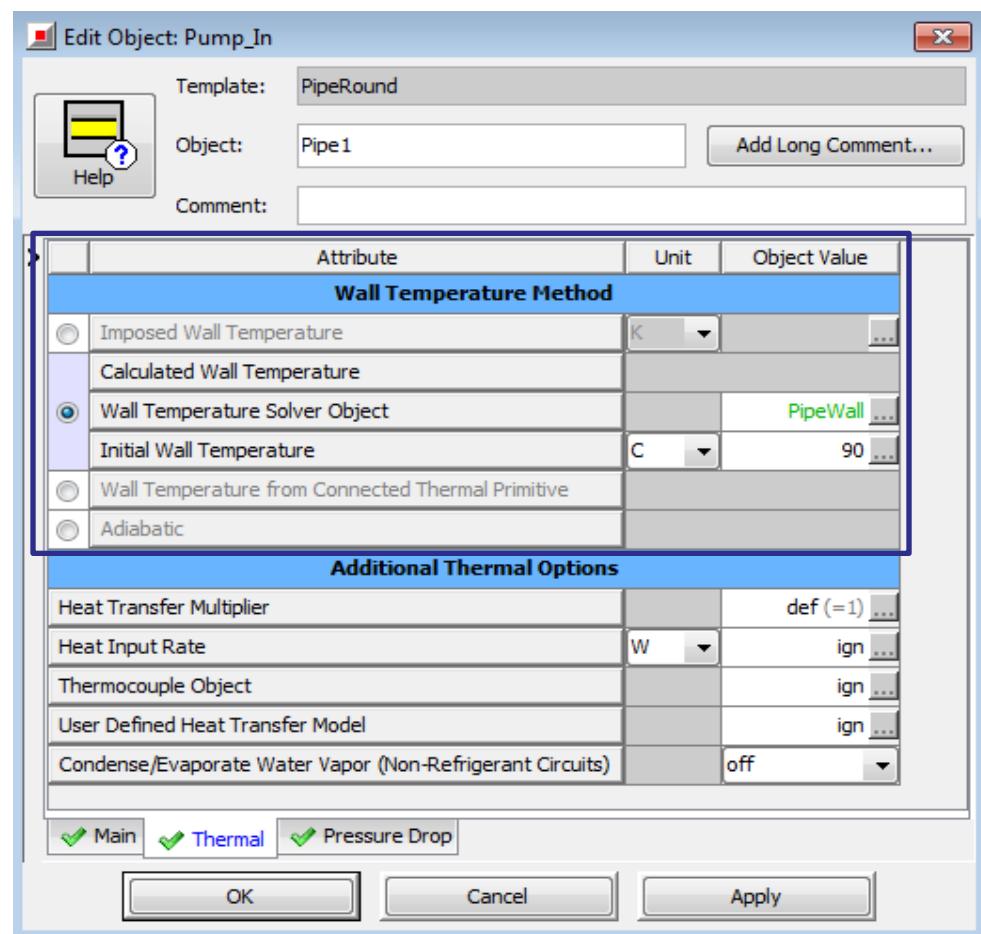
# 热管理重要特性：流体求解

---

- 基于物理的Navier-Stokes方程求解
- 即使在零流量时，也有很好的计算稳定性，如：
  - 在节温器开启前的散热器流体回路
  - 为了快速热车过程中的工作切换（如：电动水泵或离合器切换水泵，“分隔式冷却回路”机体概念）
- 由于热的影响造成 压力梯度也可以使流体产生动力源
- 同一个模型，既可以进行稳态的模拟，也可以进行瞬态模拟
  - 求解过程一直是瞬态计算
  - “稳态”简单的说：意味着结果是对应时间的关系是常数

# 热管理重要特性：管路热分析选项

- 简捷的管路模拟中有多种热分析选项
- 嵌入式的壁面温度求解（不需要额外的的 license 费用，可忽略的 CPU时间消耗）
- 同样的模型可用于液压回路和热管理部件



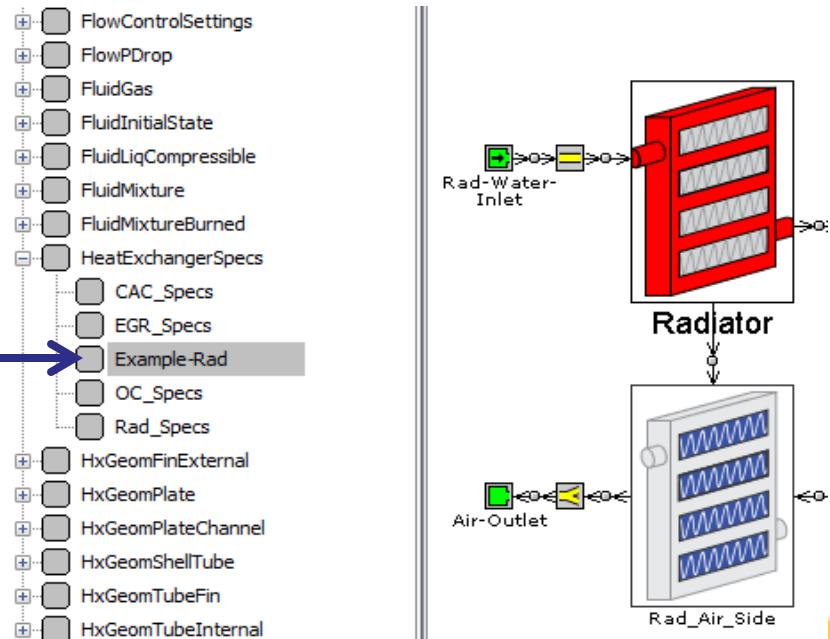
# 热管理重要特性：换热器

- 对各种散热器，参数都直观简洁
- Excel表格一键式导入
- 根据输入数据，压降的自动校正
- 支持散热器内部的离散



HEAT TRANSFER PERFORMANCE

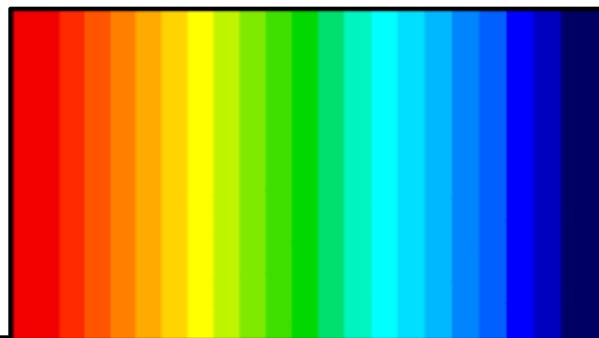
Internal Tubes			External Fins			Performance Quantity
Inlet Temperature	Inlet Pressure (static)	Flow	Inlet Temperature	Inlet Pressure (static)	Flow	
96.85	2000	0.46222	26.85	1000	0.46222	13
96.85	2000	0.90444	26.85	1000	0.46222	18
96.85	2000	1.3467	26.85	1000	0.46222	21
96.85	2000	1.7889	26.85	1000	0.46222	22
96.85	2000	2.2311	26.85	1000	0.46222	23
96.85	2000	2.6733	26.85	1000	0.46222	24
96.85	2000	3.1156	26.85	1000	0.46222	25
96.85	2000	3.5578	26.85	1000	0.46222	26
96.85	2000	4	26.85	1000	0.46222	26
96.85	2000	0.46222	26.85	1000	0.90444	17



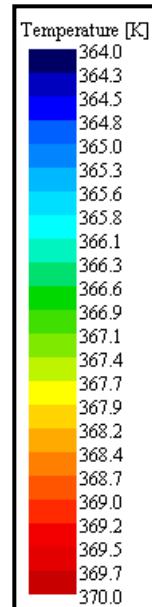
# 热管理重要特性：换热器 - 按比例缩放

■ 在“As Used”的几何属性中可以按比例的缩放散热的几何尺寸

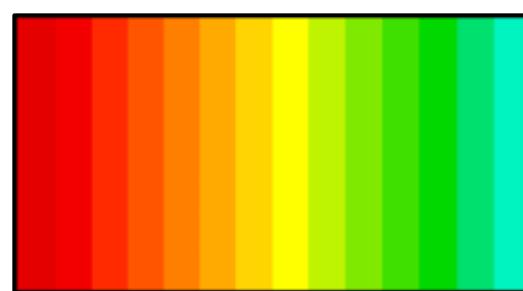
- “测试的” 几何
- 31 tubes
- 500 mm tube length



$\bullet T_{out} = 364.1 \text{ K}$        $\bullet m = 1.090 \text{ kg/s}$   
 $\bullet Q = 37.53 \text{ kW}$



- “用户定义” 几何
- 21 tubes
- 400 mm tube length



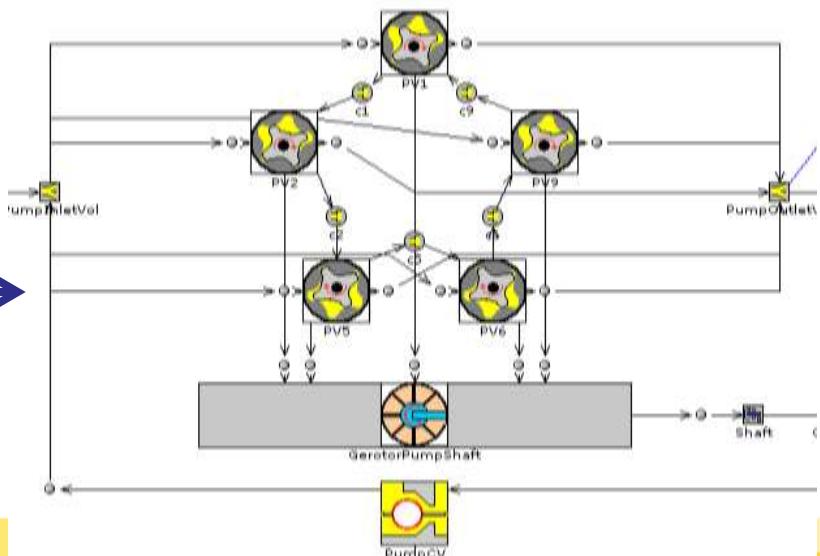
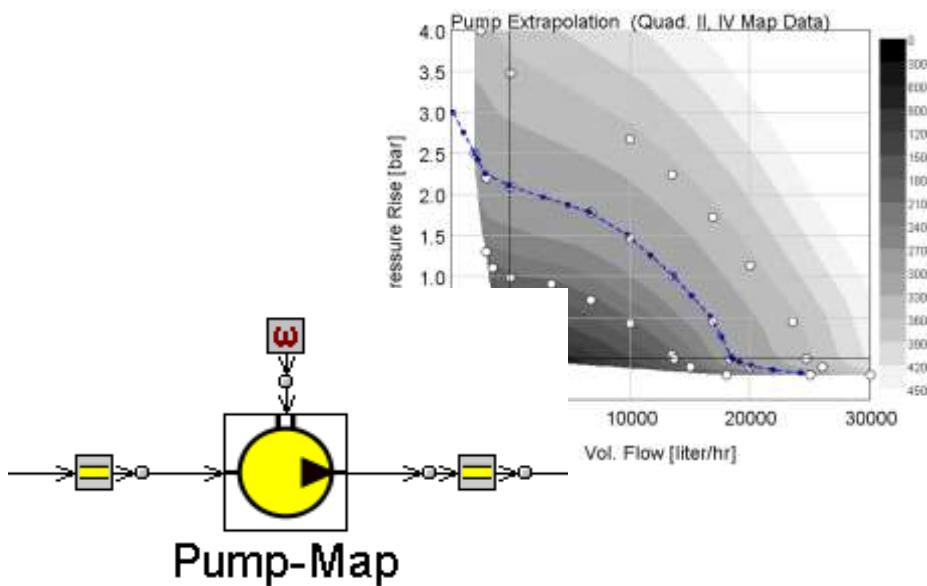
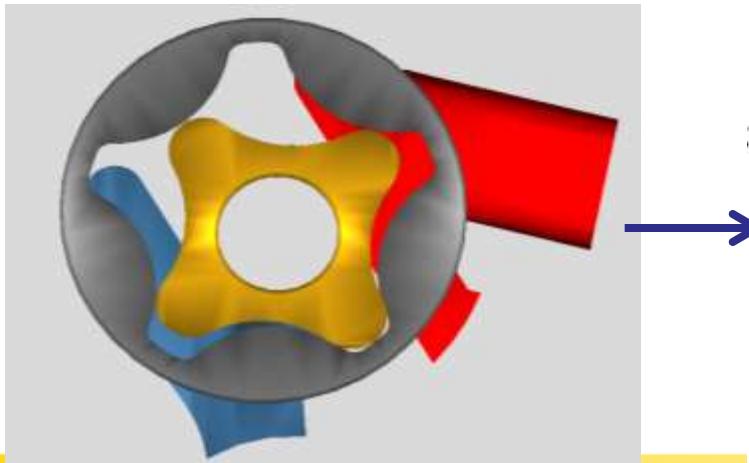
$\bullet T_{out} = 366.4 \text{ K}$        $\bullet m = 0.584 \text{ kg/s}$   
 $\bullet Q = 23.49 \text{ kW}$

\*External boundary conditions held constant: ram velocity and temperature

\*Internal boundary conditions held constant: mass flow rate and temperature

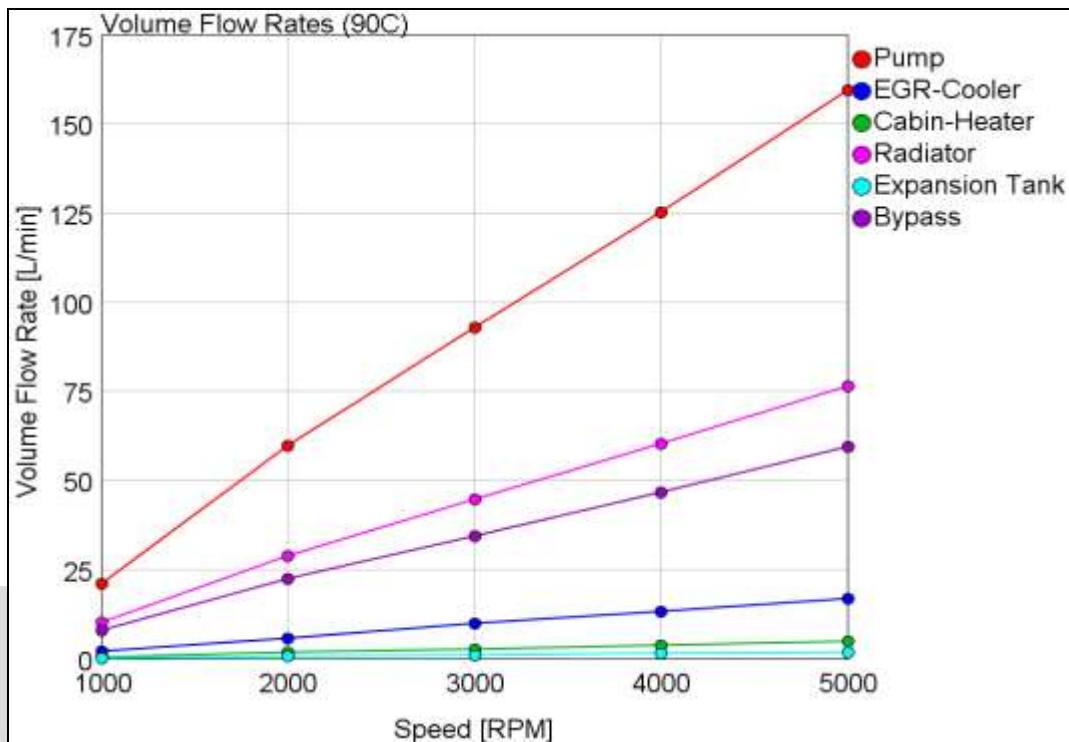
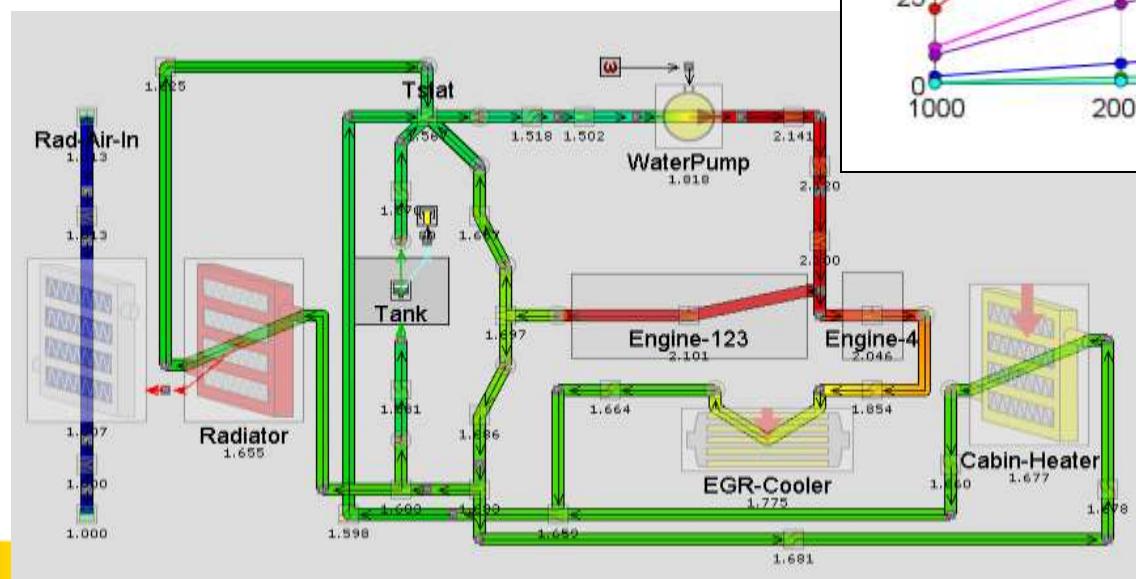
# 热管理重要特性：泵

- 液体泵可以在不同的水平层次进行模拟
  - 简单的流量输入泵
  - 基于性能测试数据MAP图的查找模拟
  - 基于排量的泵
  - 详细的带有预测功能的泵



# 热管理重要特性：液体回路系统

- 流体回路的布置
  - 部件的选择
  - 初步 HX 的选型

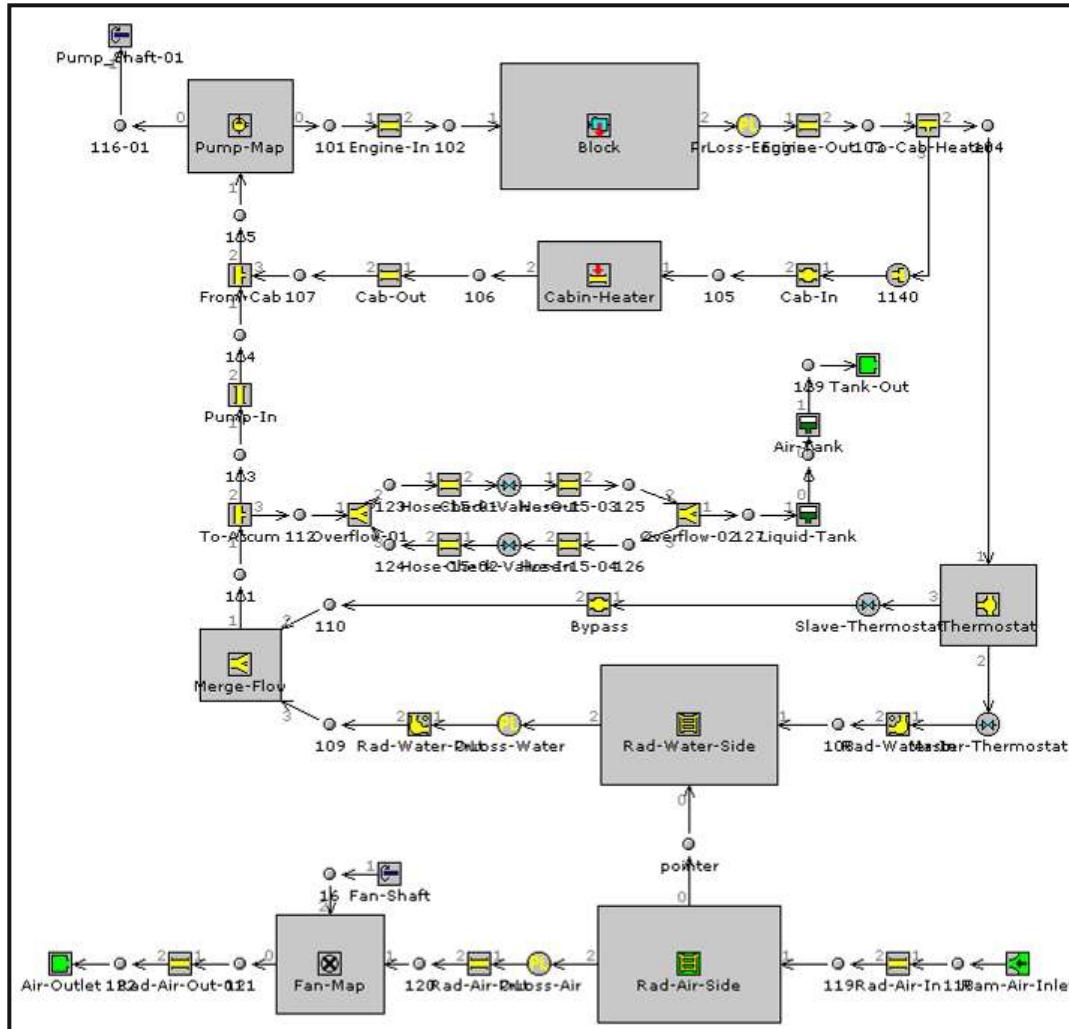


# GT-SUITE在热管理上的应用

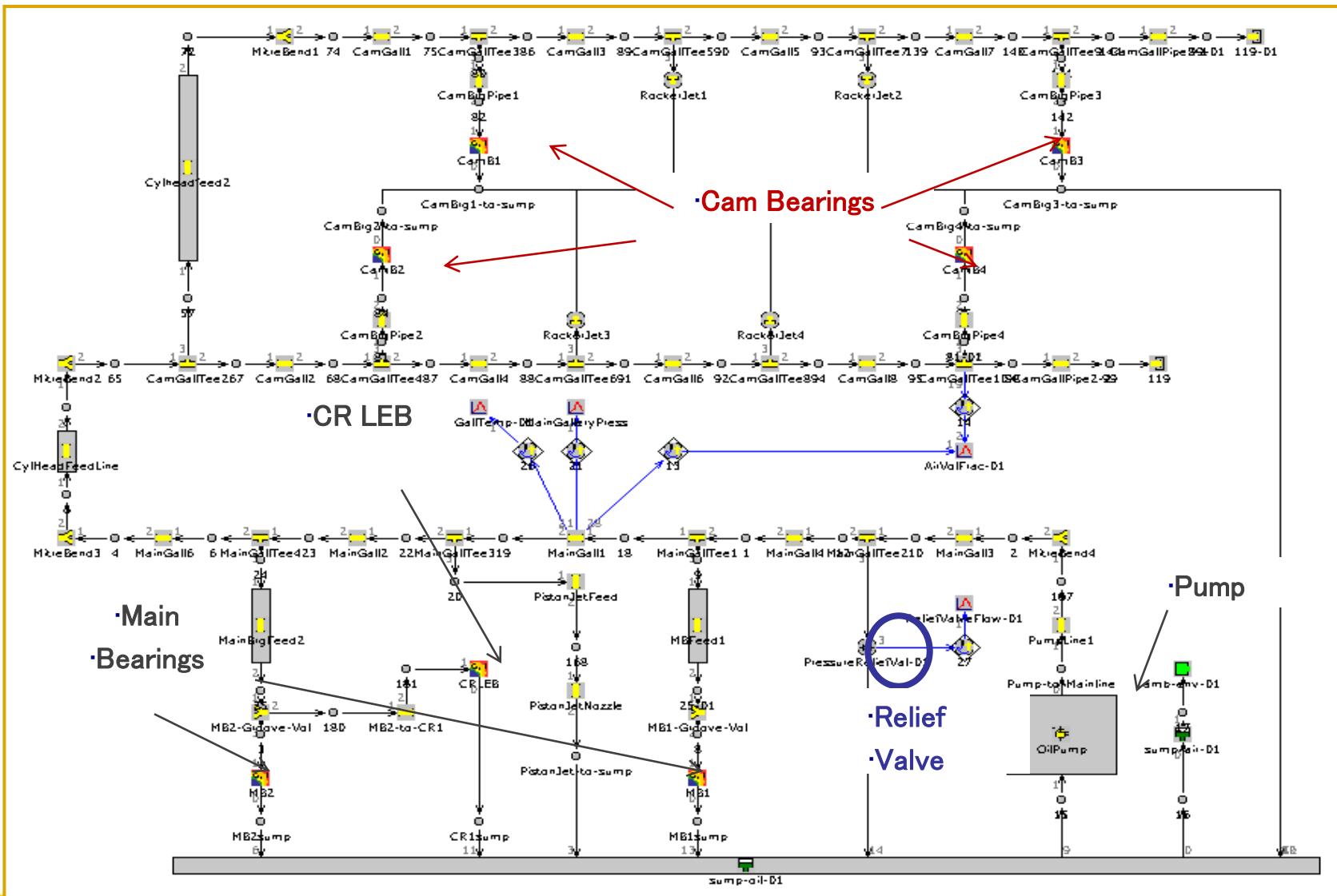
---

- GT-SUITE在热管理上的重要特性
- 热管理上的应用内容
  - 发动机冷却系统
  - 润滑系统
  - 机舱热管理
  - 空调系统
  - 能量分析

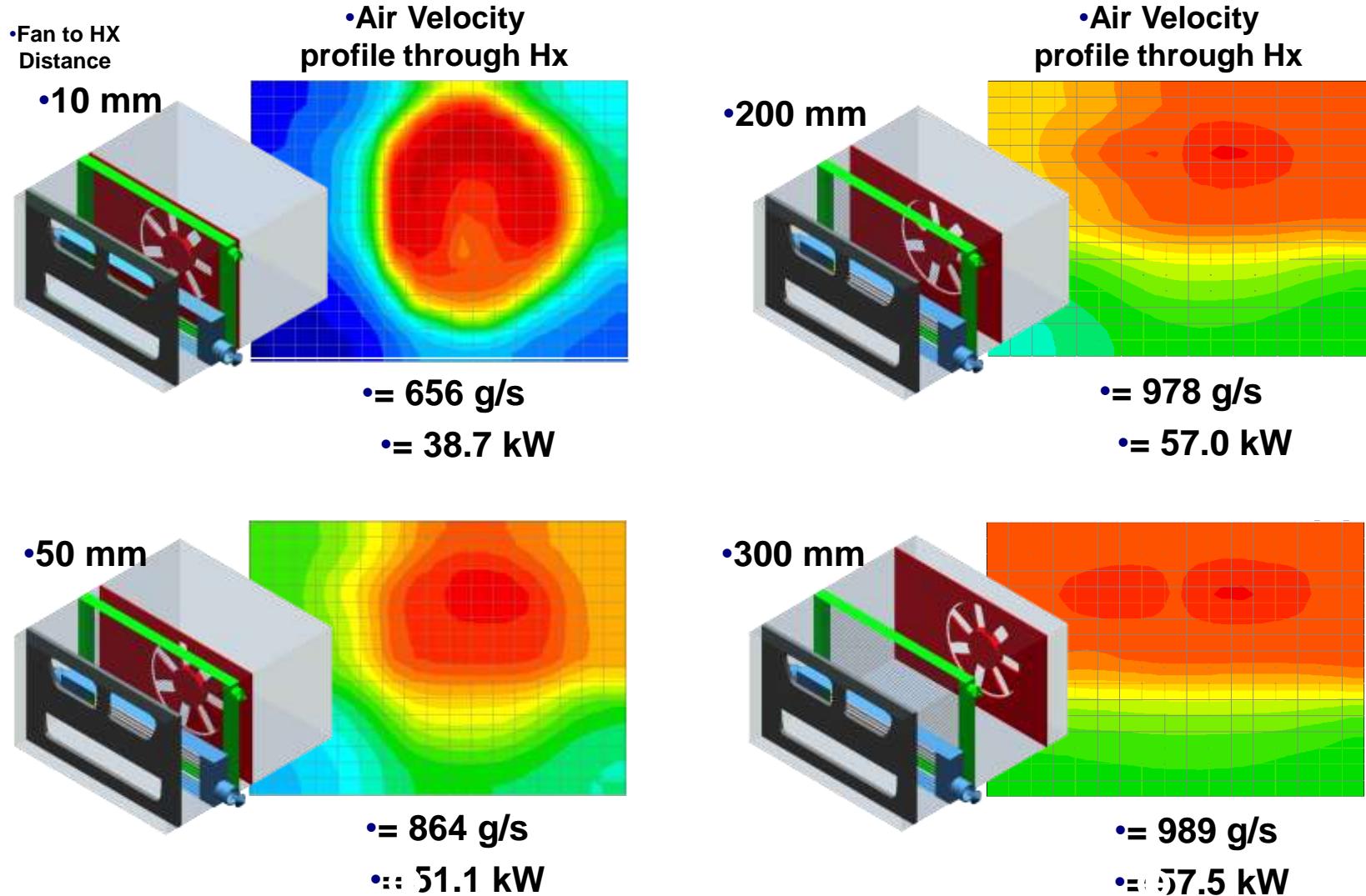
# 冷却回路模拟



# 润滑系统模拟

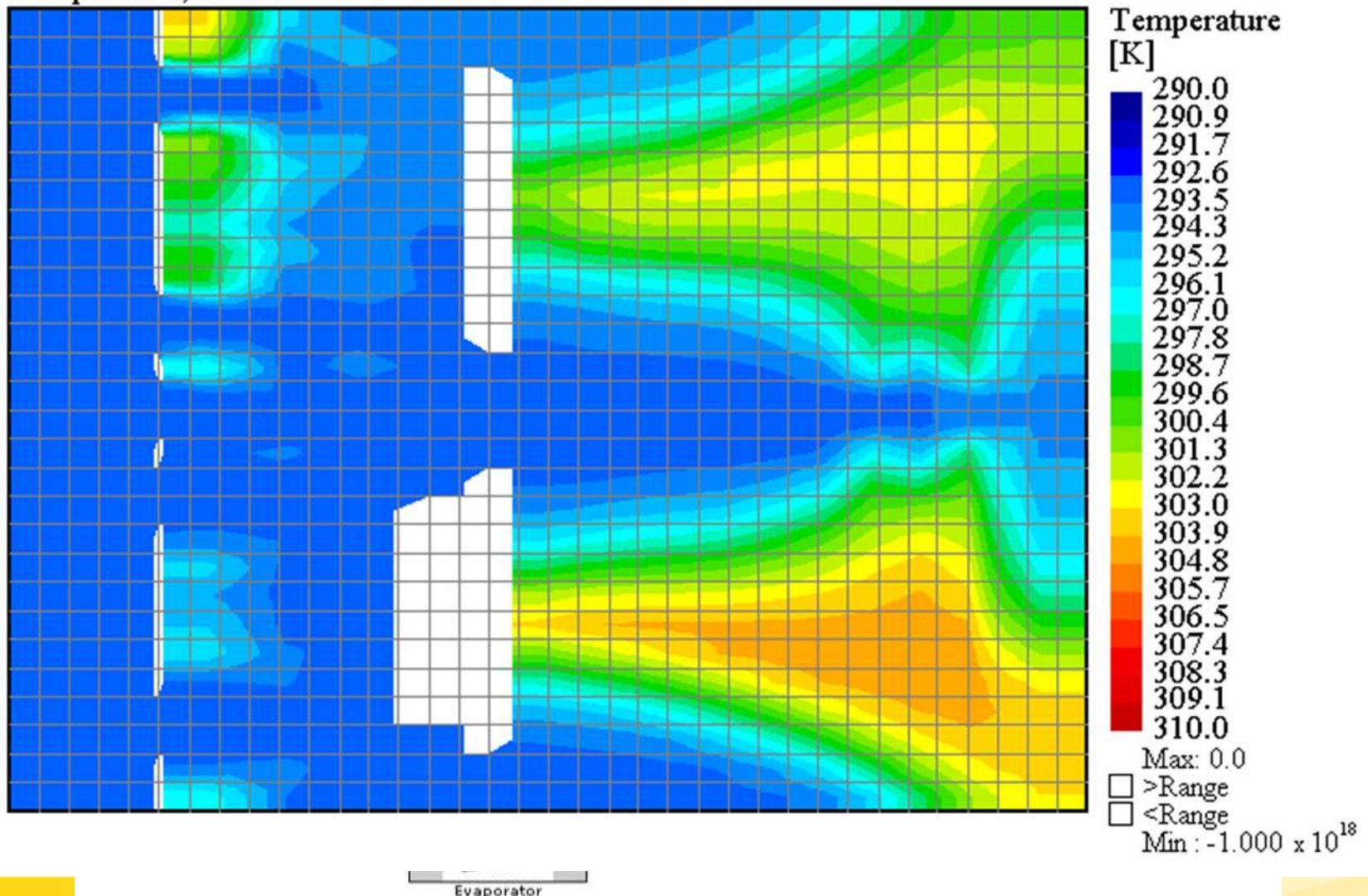


# 机舱热管理

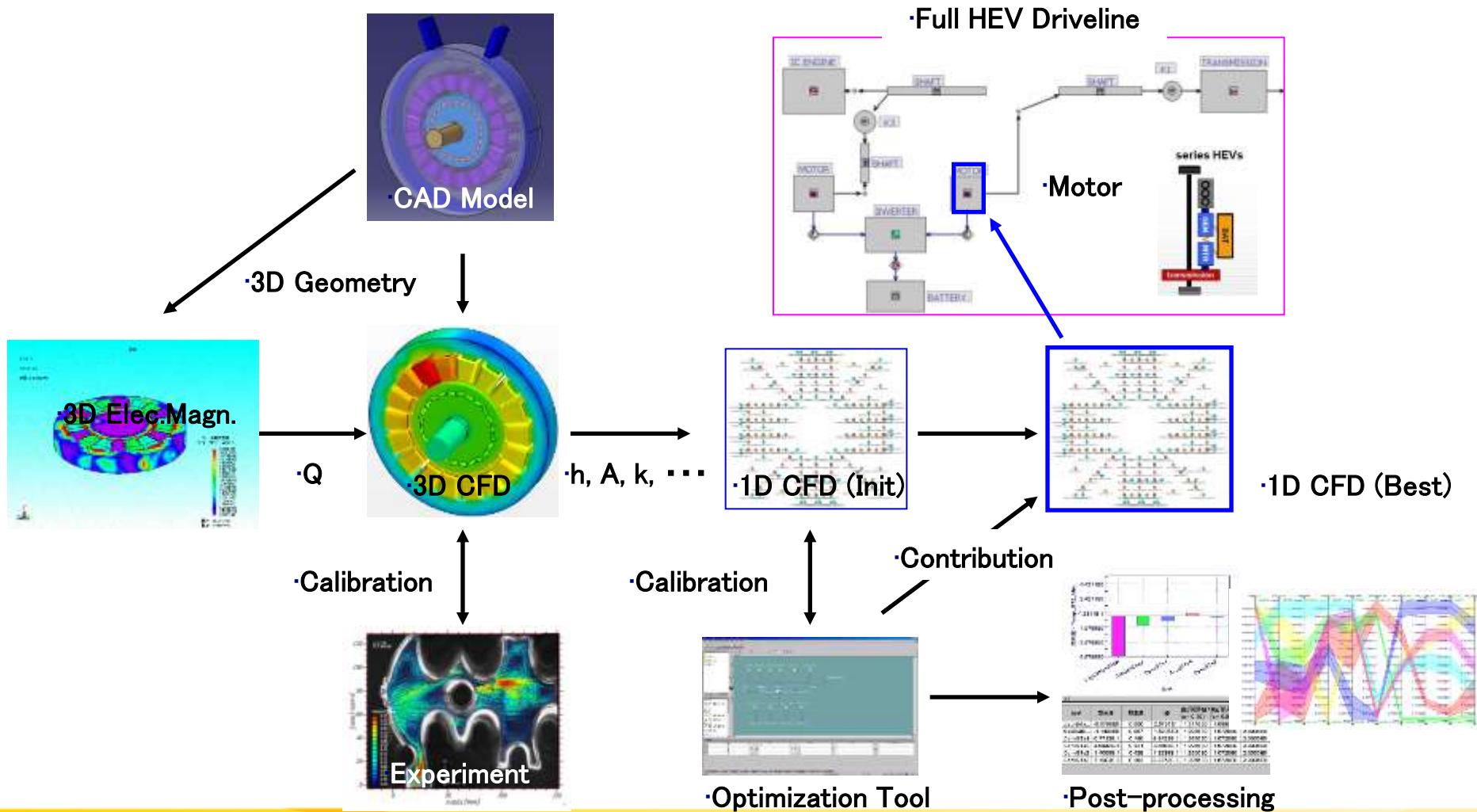


# 空调系统模拟

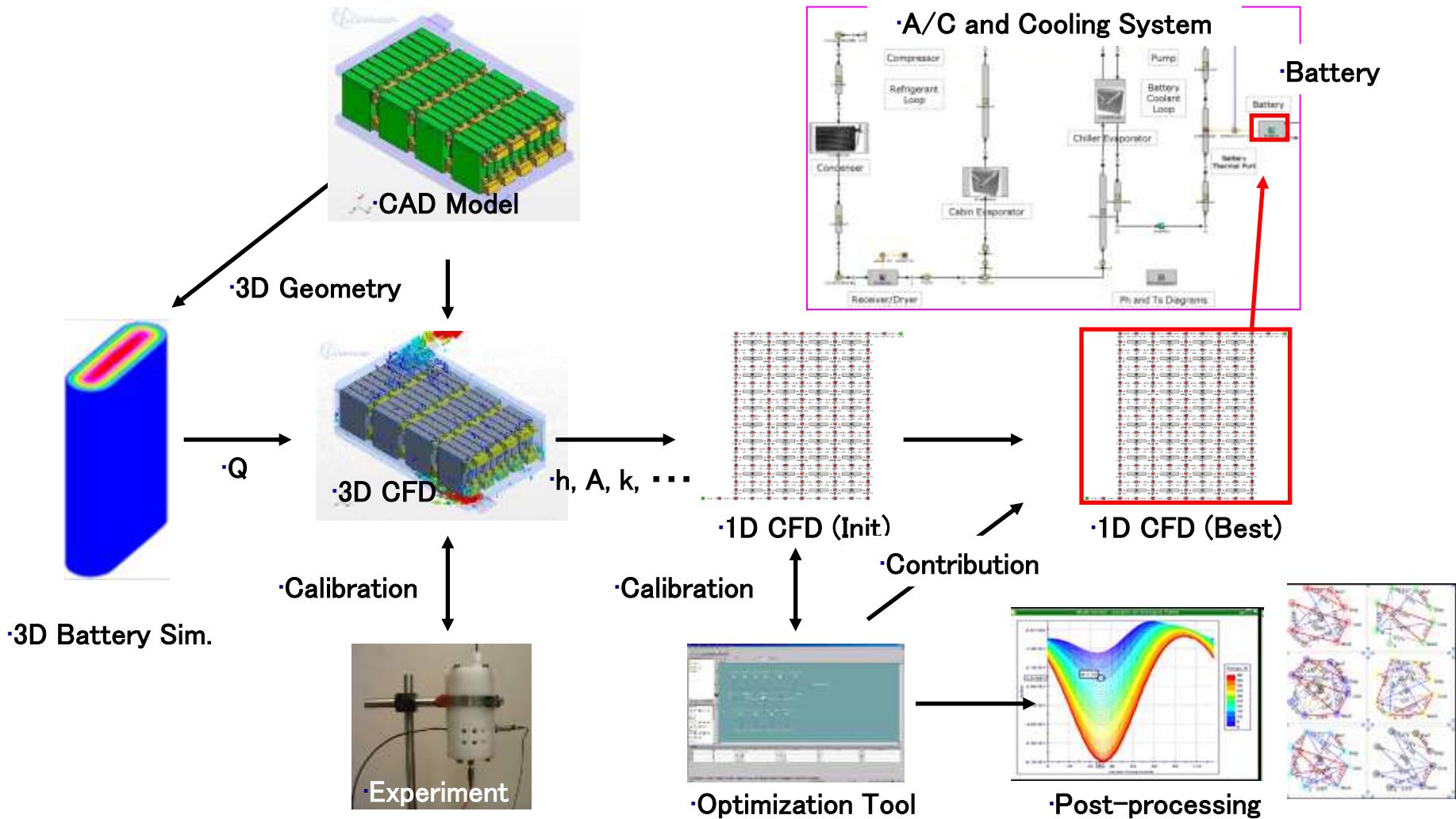
Temperature, 60 sec



# HEV电机冷却分析



# 蓄电池冷却分析



# 内 容

---

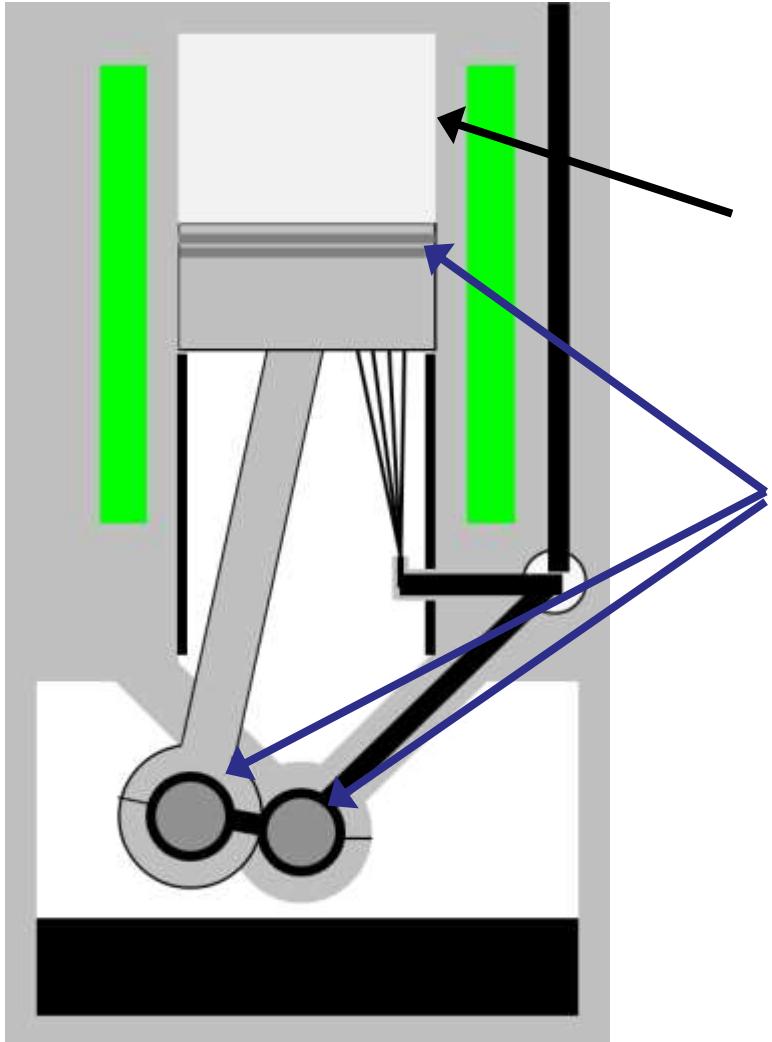
- GT-SUITE在热管理上的应用
  - 重要特性
  - 热管理主要分析内容
- 发动机暖机模拟说明
- GT-SUITE7.5的解决方案
  - 具体建模型过程

# 暖机过程

---

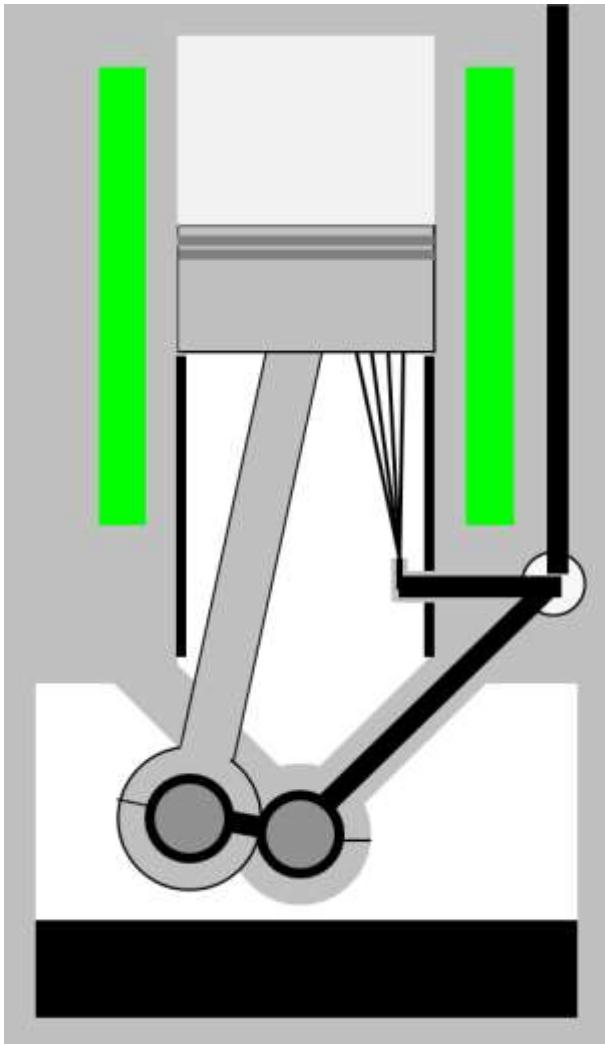
- 瞬态测试循环的经济性，特别是在起始的暖机过程中的燃料消耗也是关注的重点之一
  - 如何对冷却系统进行设计优化降低暖机过程的燃油消耗？
- 问题：
  - 系统中需包含哪些部分？
  - 模型需要怎样的详细程度？（集总的缸体模型是否满足？）

# 暖机过程



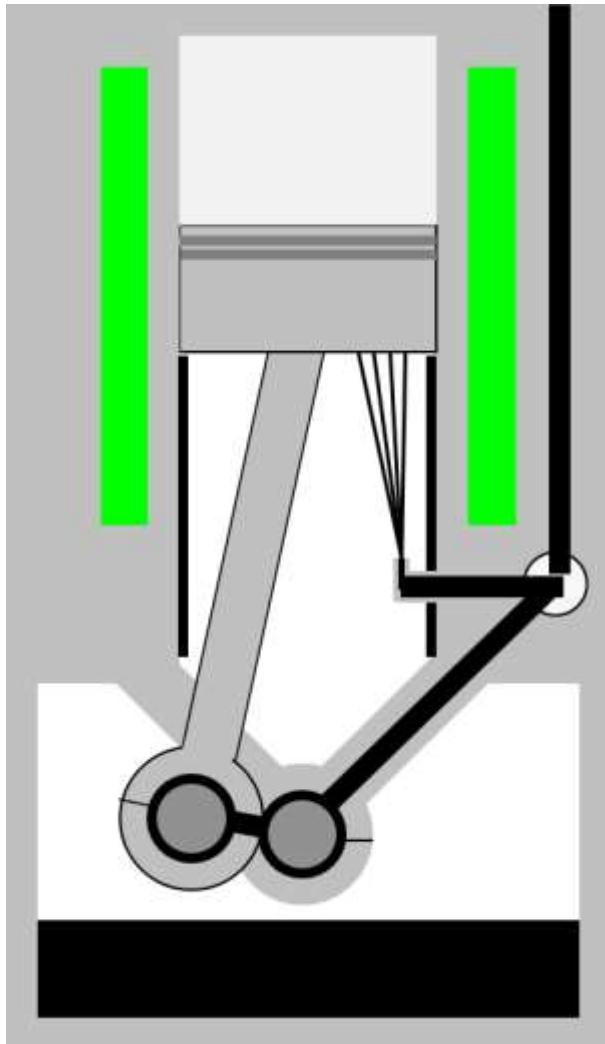
- 暖机过程中，BSFC增加由于：
  - 通过缸壁的热量损失增加
  - 需克服的摩擦增加
- 摩擦是首要的因素

# 暖机过程



- 摩擦主要与油温和结构表面温度有关
- 摩擦热使结构（如活塞，缸套）和润滑油（如曲轴主轴承处）温度升高
- 仅与油接触的结构（如曲轴，油底壳）的升温过程

# 暖机过程



- 缸体/缸盖结构在冷却液和润滑油之间起到散热器一样的作用
- 一般还包含冷却液/润滑油的外部散热器

# 暖机过程

---

暖机过程模拟：

- 必须模拟缸体/缸盖内的冷却水套
- 必须模拟润滑系统
- 必须模拟所有关键部件（质量体）
- 摩擦模型必须考虑温度的影响
- 摩擦热作用于在金属结构和润滑油

# 摩擦损失

---

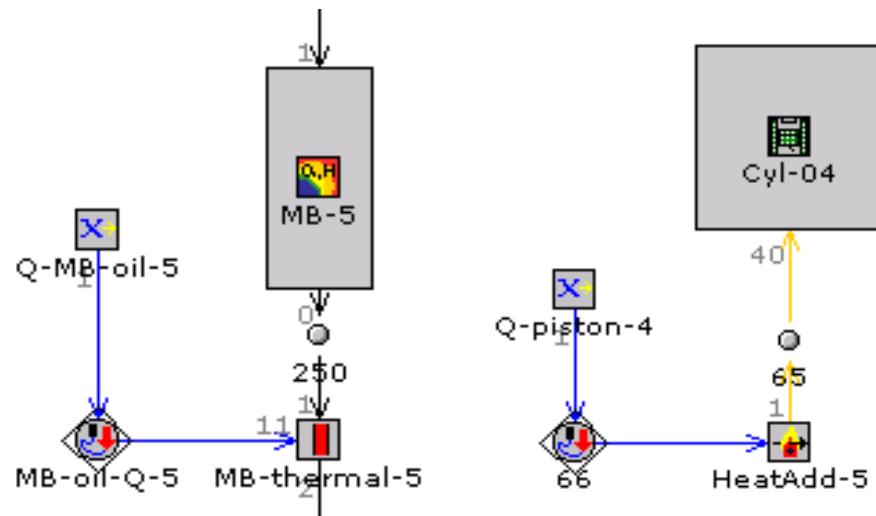
- 在测功机上“strip down” 倒拖试验
- 测量不同工况下的倒拖扭矩，确定在各系统中的的摩擦损失
  - 配气机构
  - 活塞组
  - 曲轴系统等
- 获得不同发动机转速以及油温下的摩擦损失

# 摩擦损失

- 每一个部件内部摩擦损失进行查表

$$\text{Friction} = f(\text{RPM}, \text{Toil})$$

- 所有部件的损失相加得到FMEP
- 将每一部件的摩擦损失作为热量传给润滑油或机体机构



# 摩擦损失

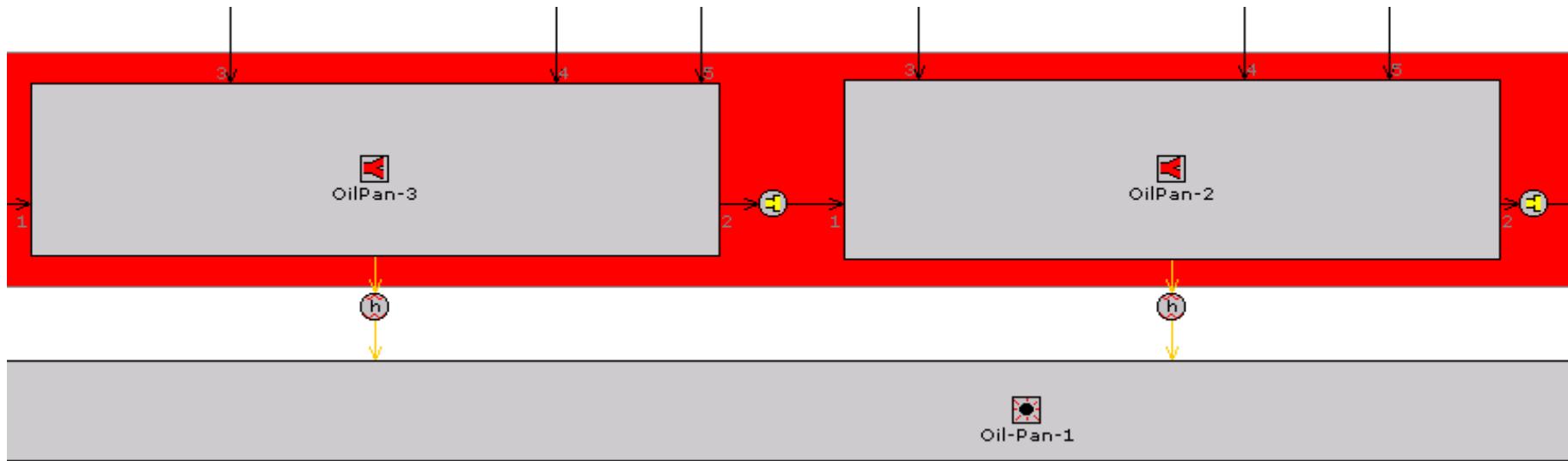
---

## ■ 经验的摩擦模型

- “Schwarzmeier” 模型可用于柴油机  
 $FMEP = f(RPM, BMEP, T_{coolant}, T_{oil})$
- 如需要也可采用其他模型（联系 GTI）
- 将FMEP 用于发动机( ‘EngineState’ or ‘EngineCrankTrain’ )
- 将FMEP换算成功率或热量分配至各个部件
  - ~40% to piston/liner interface 活塞/缸套
  - ~25% to crank main bearings, etc. 曲轴主轴承
- 精度没有测试数据高

# 其它结构模拟

- 考虑发动机中所有关键的零部件的模拟（使用Thermal Mass）
  - Crankshaft曲轴
  - Camshafts凸轮轴
  - Connecting Rods连杆
  - Oil Pan油底壳
  - Oil Pump油泵



# 内 容

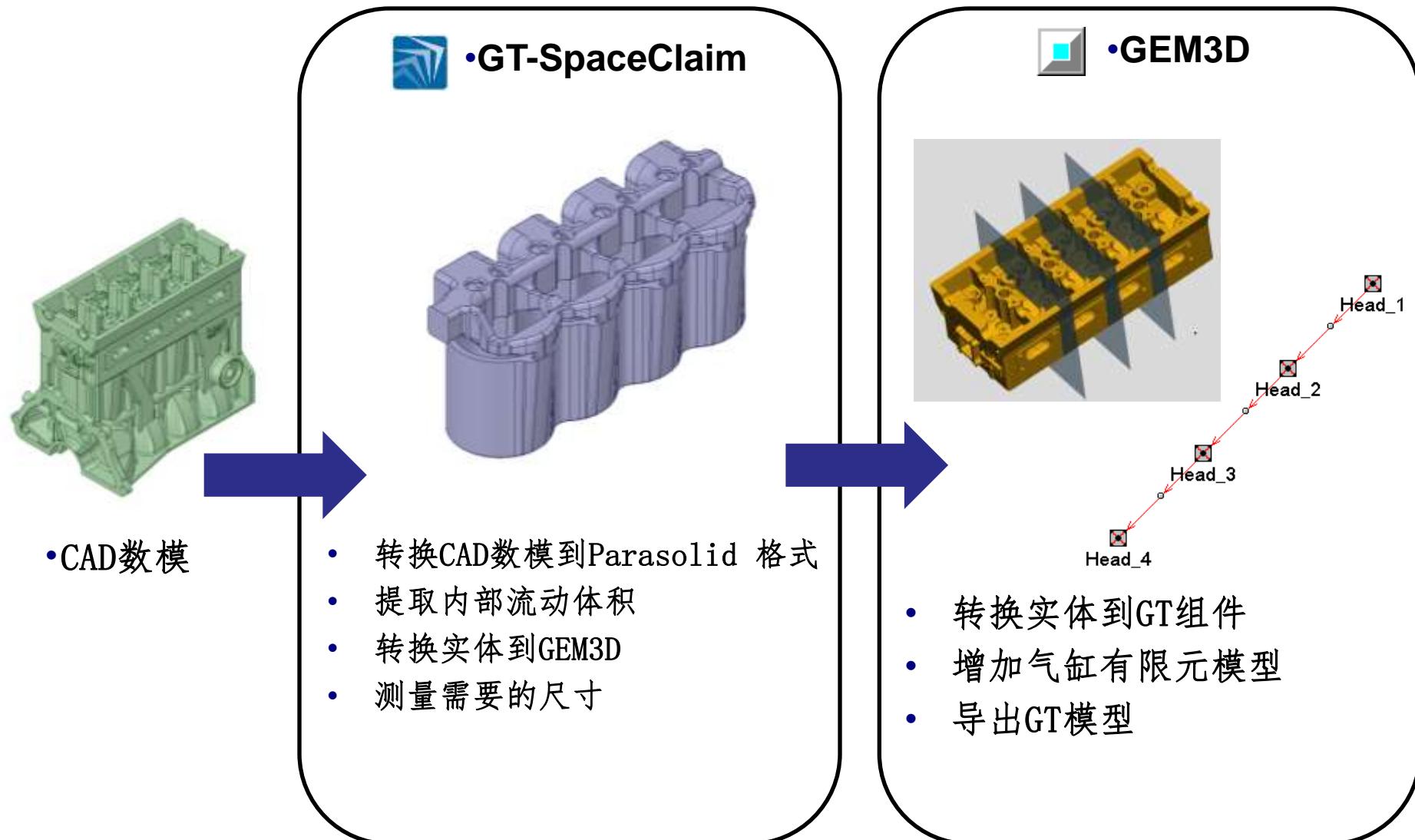
---

- GT-SUITE在热管理上的应用
  - 重要特性
  - 热管理主要分析内容
- 发动机暖机模拟说明
- GT-SUITE7.5的解决方案
  - 具体建模型过程

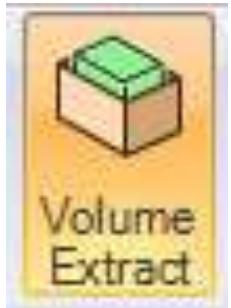
# 热分布模型建立过程

- |              |           |   |
|--------------|-----------|---|
| 1. 创建流动体积    | (SC, GEM) |  |
| 2. 创建有限元气缸模型 | (GEM)     |  |
| 3. 创建热质量模型   | (GEM)     |  |
| 4. 装配模型      | (GT-ISE)  |  |
| 5. 标定        | (GT-ISE)  |  |
| 6. 连接发动机     | (GT-ISE)  |  |
| 7. 增加摩擦热     | (GT-ISE)  |  |
| 8. 增加其他回路    | (GT-ISE)  |  |

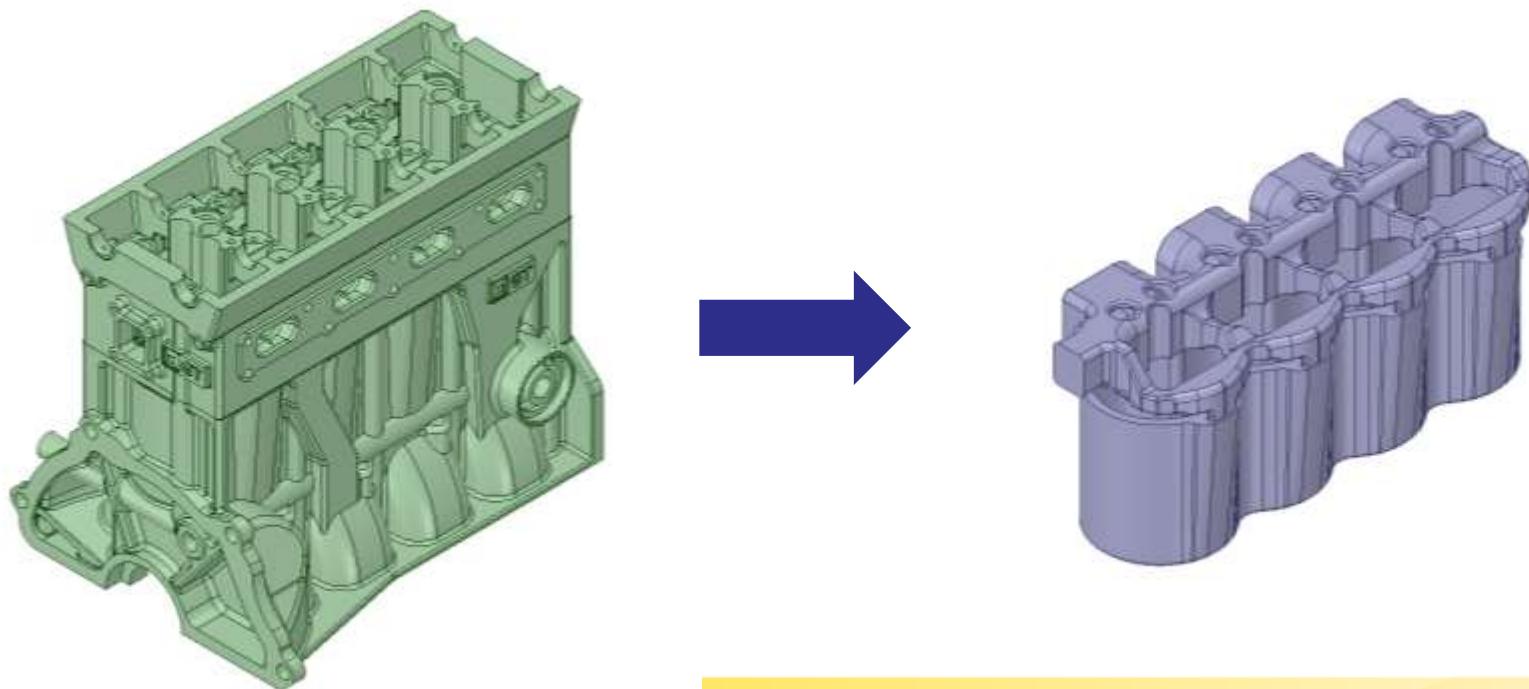
# 模型建立过程简介



# Spaceclaim: 创建流动体积

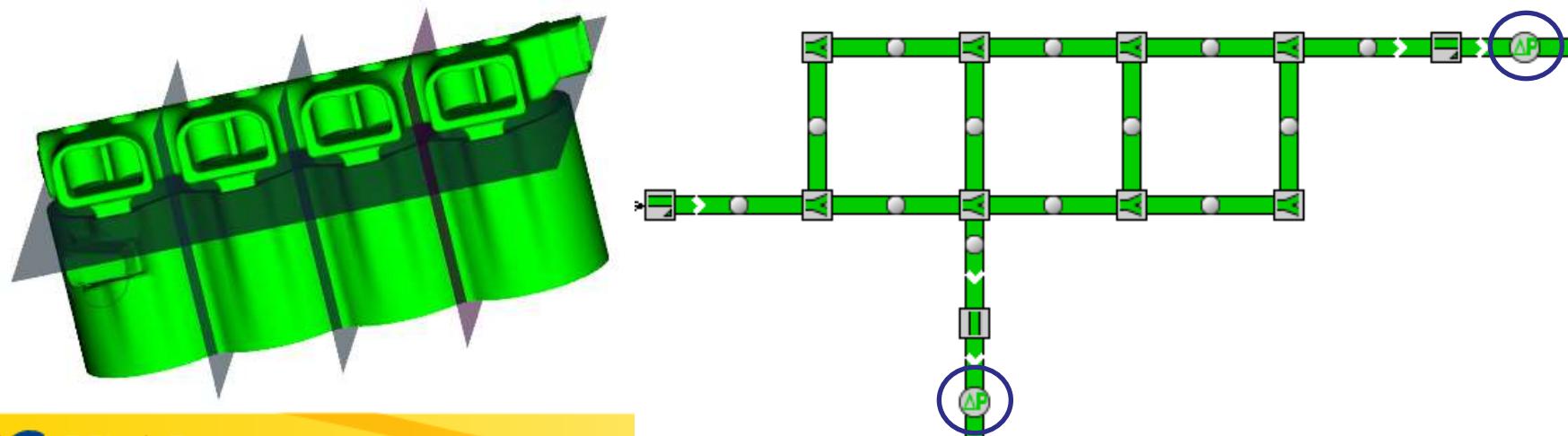


- 填充组件的内部来提取流道 - 代表缸盖水套和机体水套



# 水套特性

- Water 水套是复杂的-3维流动特性，with 3D flow phenomenon
- 很难用一维模型来预测流量分配
- 推荐方法：
  - 用一个粗糙的离散来获取热求解率
  - 标定体积和热传面积
  - 最小化水套内部的流动损失
  - 施加特征化的压降曲线 (from CFD) 在每个出口，来保持与外部连接分支的正确的流量分配



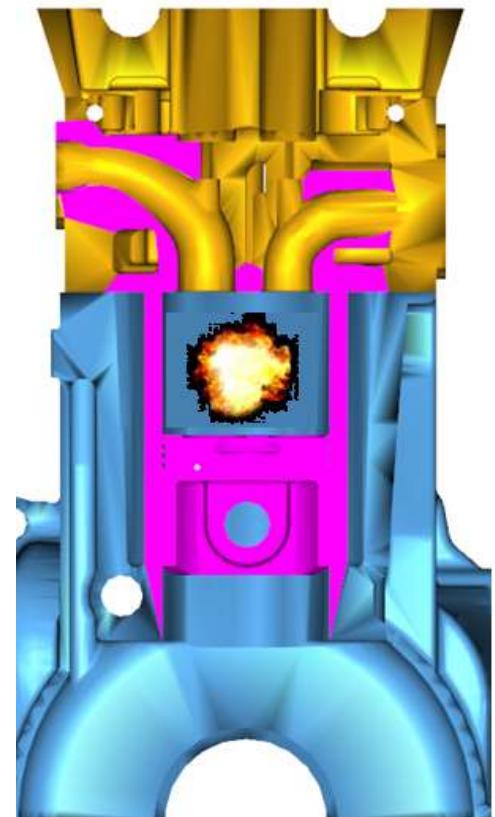
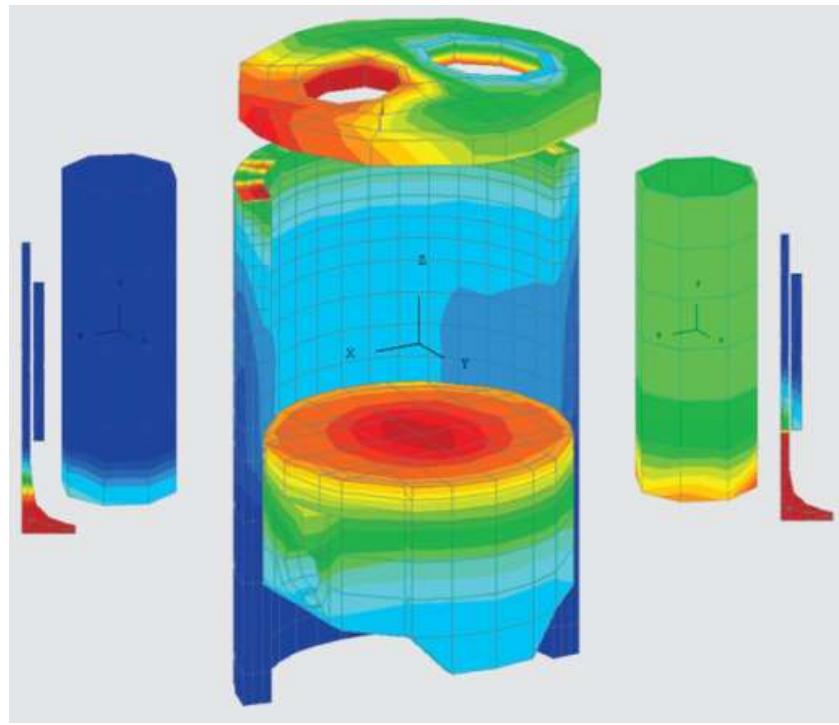
# 切割 & 转化流动体积

- 在GEM3D, 采用切割工具来分割水套的实体
- 转化每一个实体形状到流动组件
  - 体积进出口处的管子
  - 水套体积采用shell转化child datum planes分割



# 热的有限元模型 - 气缸

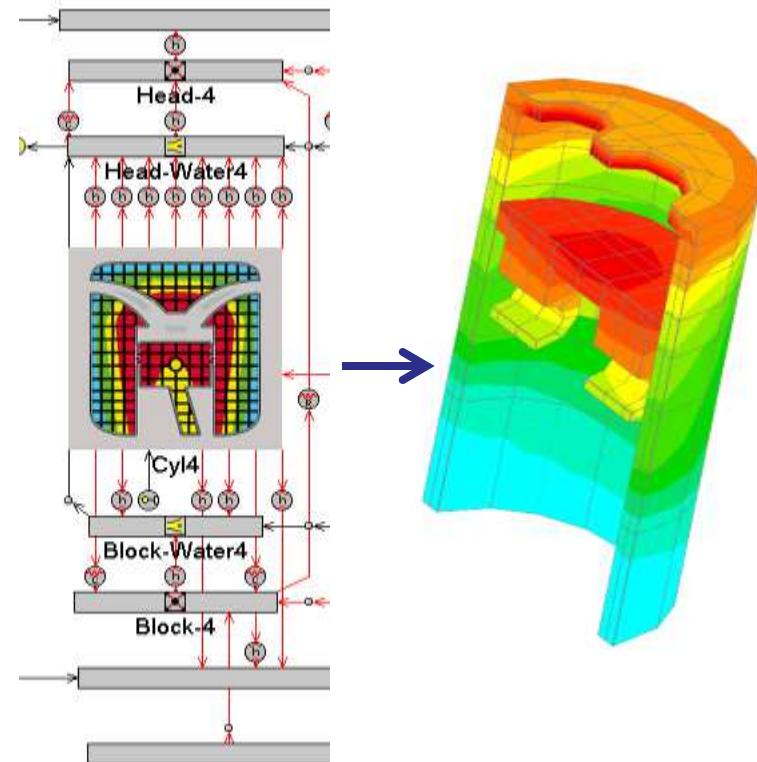
## ■ 参数化的气缸模型



# 气缸有限元模型 - Cylinder

## - 参数化有限元模板

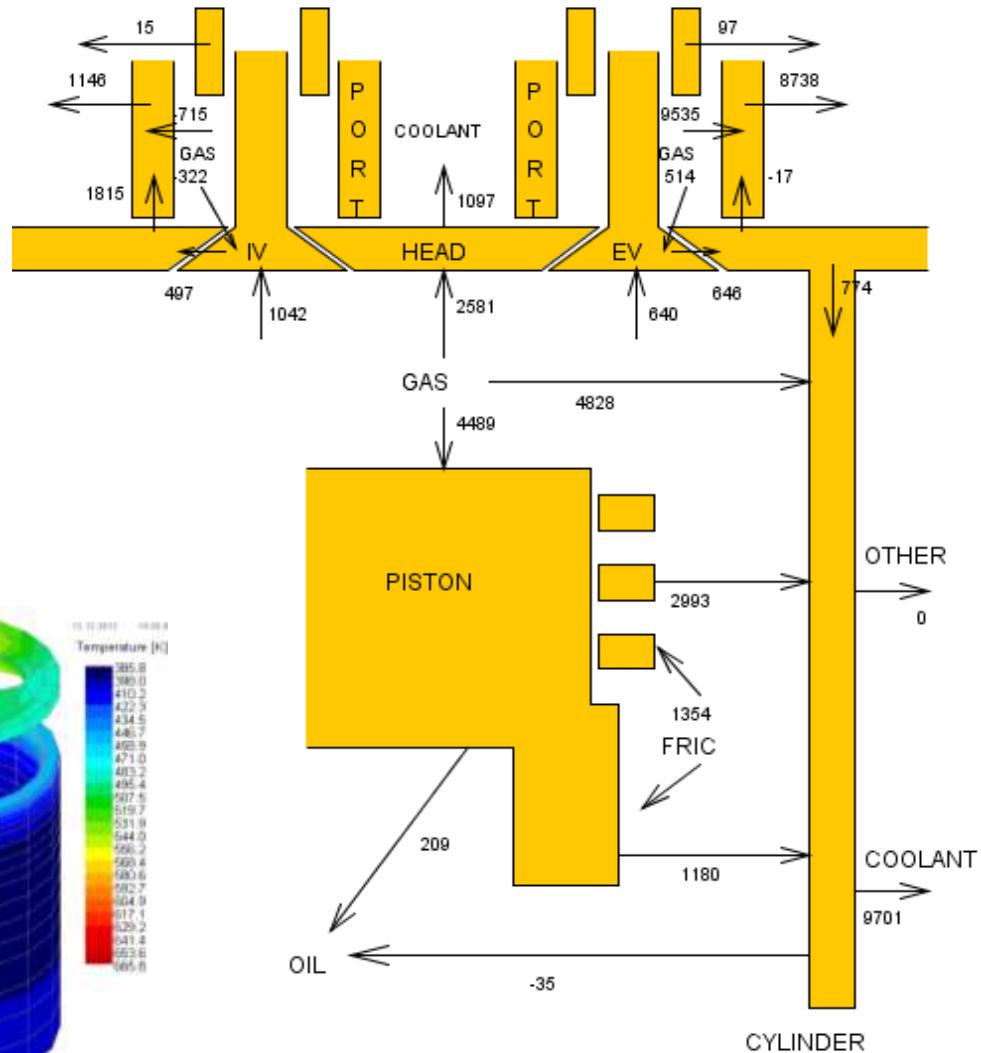
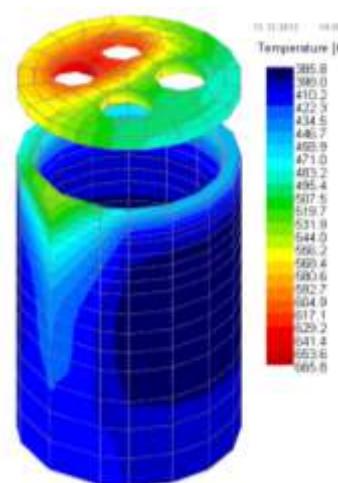
- 燃烧室周围的气缸结构被离散成了很多小的单元
- 气道与冷却液、润滑油等进行热传递
- 在发动机模型中冷却液与润滑油的边界条件被施加
- 在冷却系统中，气侧边界条件被施加
- 对耦合的engine + cooling + oil system模型可以作为一个结构化的边界被施加
- 耦合快速运行模型进行冷却与燃烧的相互影响分析



# Thermal FE - Cylinder

## 气缸有限元输出

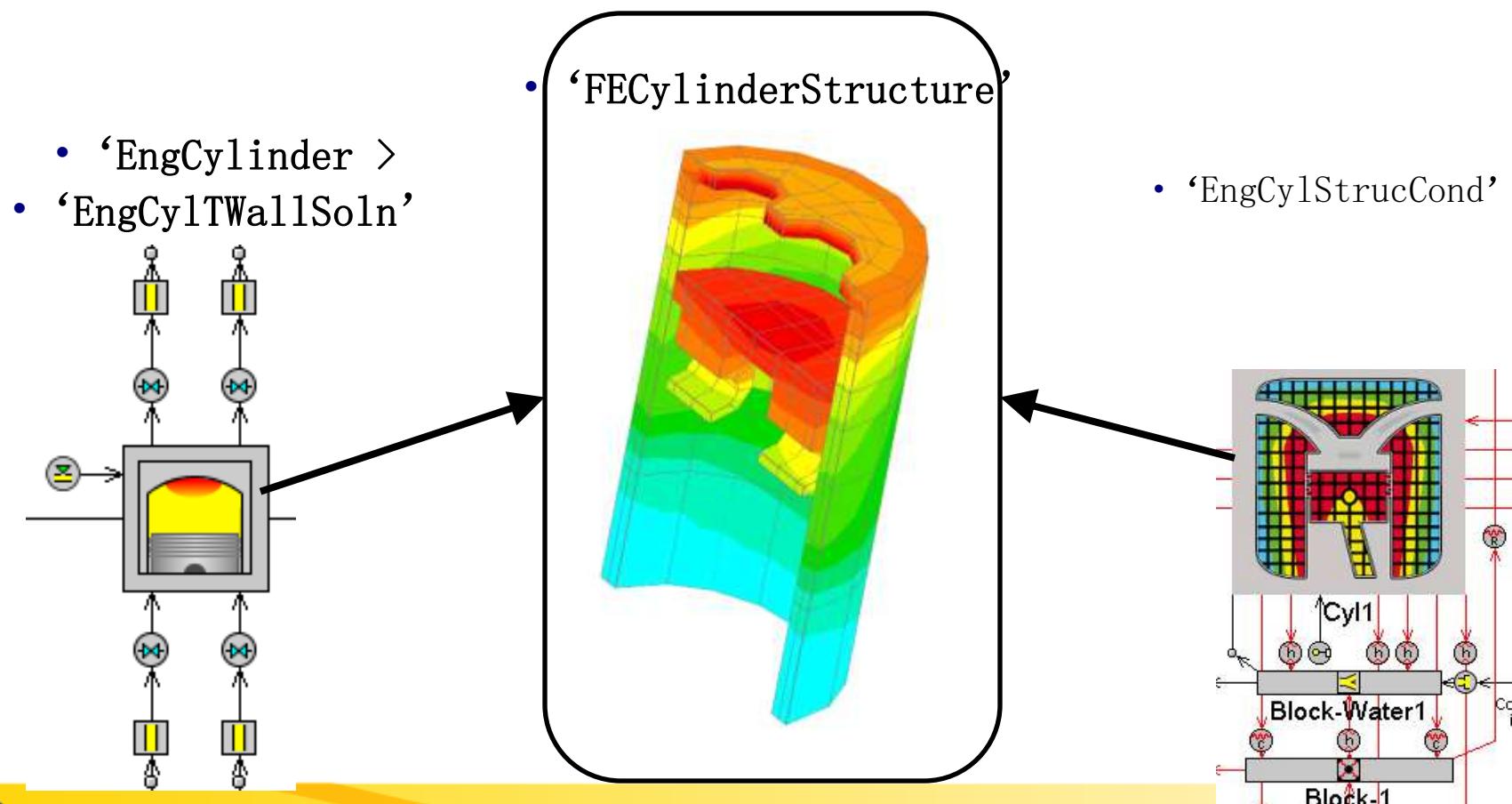
- 预测热量分布从燃烧室和气道到冷却液和润滑油
- 摩擦被作为热源项施加到活塞环和活塞裙部



# V7.5 气缸有限元模型

## ■ 有限元气缸被发动机和冷却模型公用

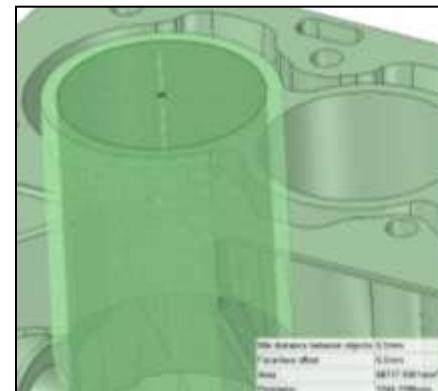
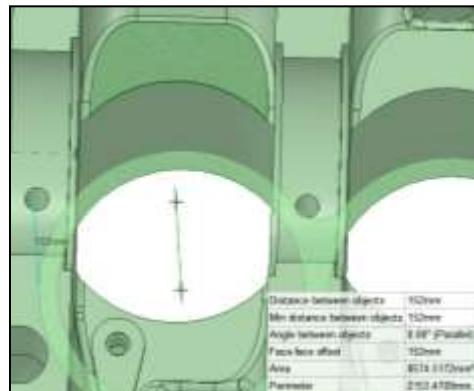
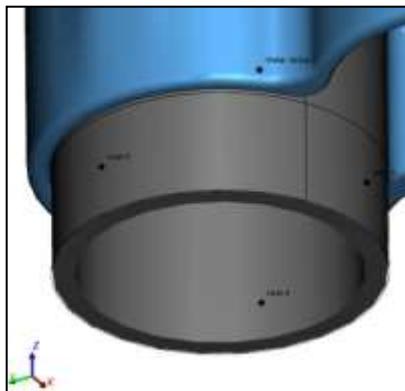
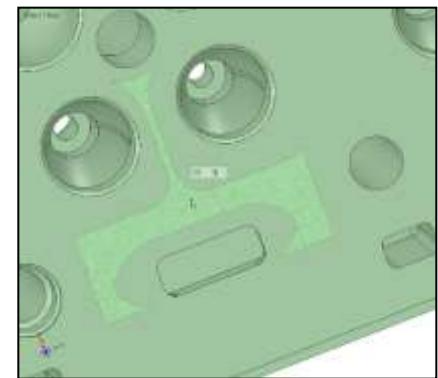
- 更容易建立冷却模型从现有的发动机模型
- 有利于模型在不同的部门间分享



# 气缸有限元模型

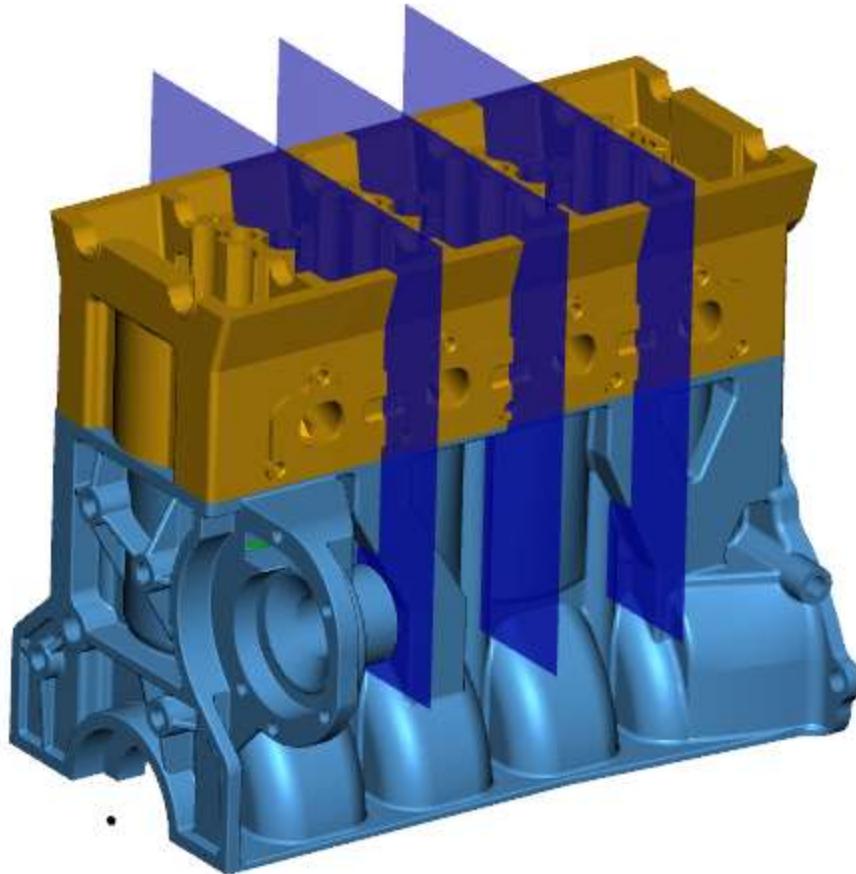
结构参数值可以被测量

- 缸盖平面厚度
- 缸套厚度
- 气缸长度
- 水套上表面距离
- 水套下表面距离
- 水套角度



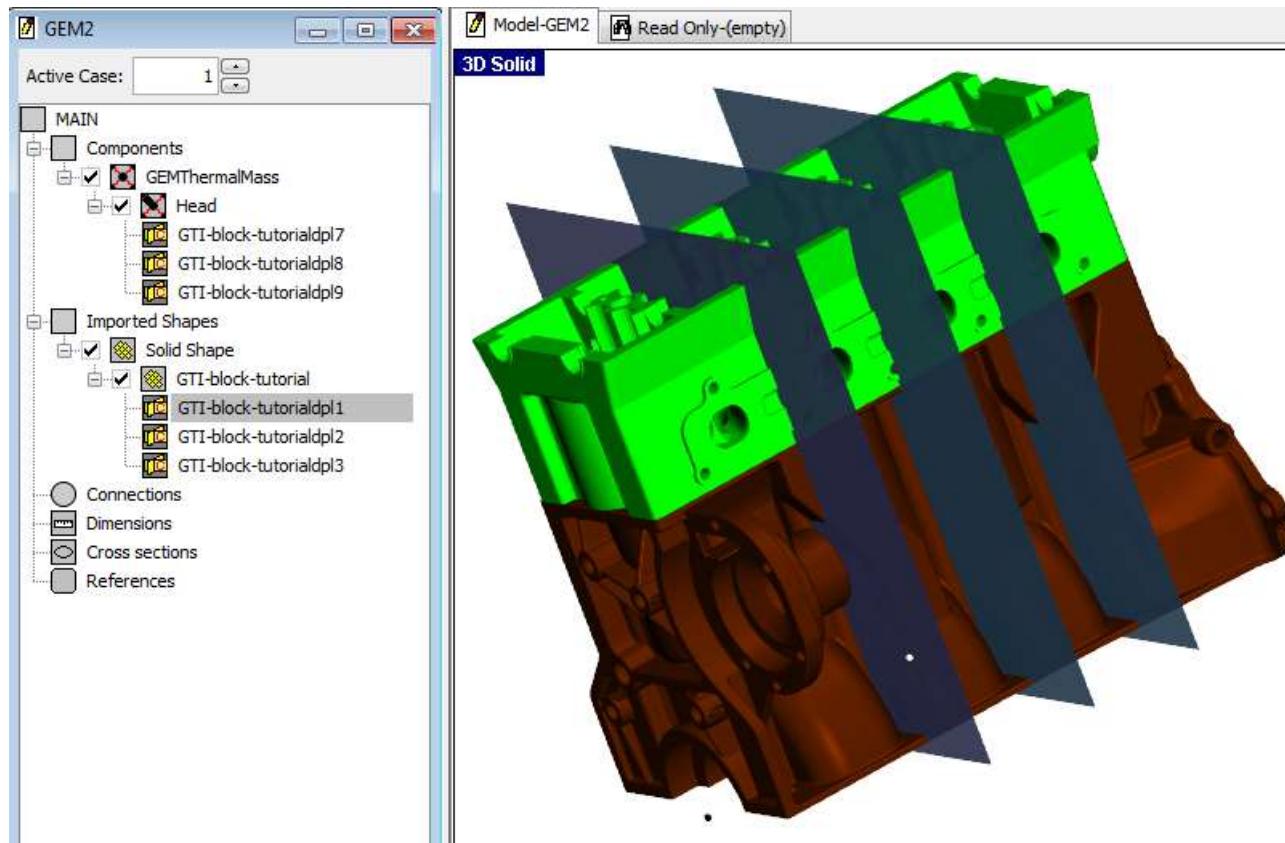
# 切割转化热质量体

- 在GEM3D, 转化导入的实体形状（机体和缸盖）到热质量体
- 用与水套切割相同的child datum planes切割



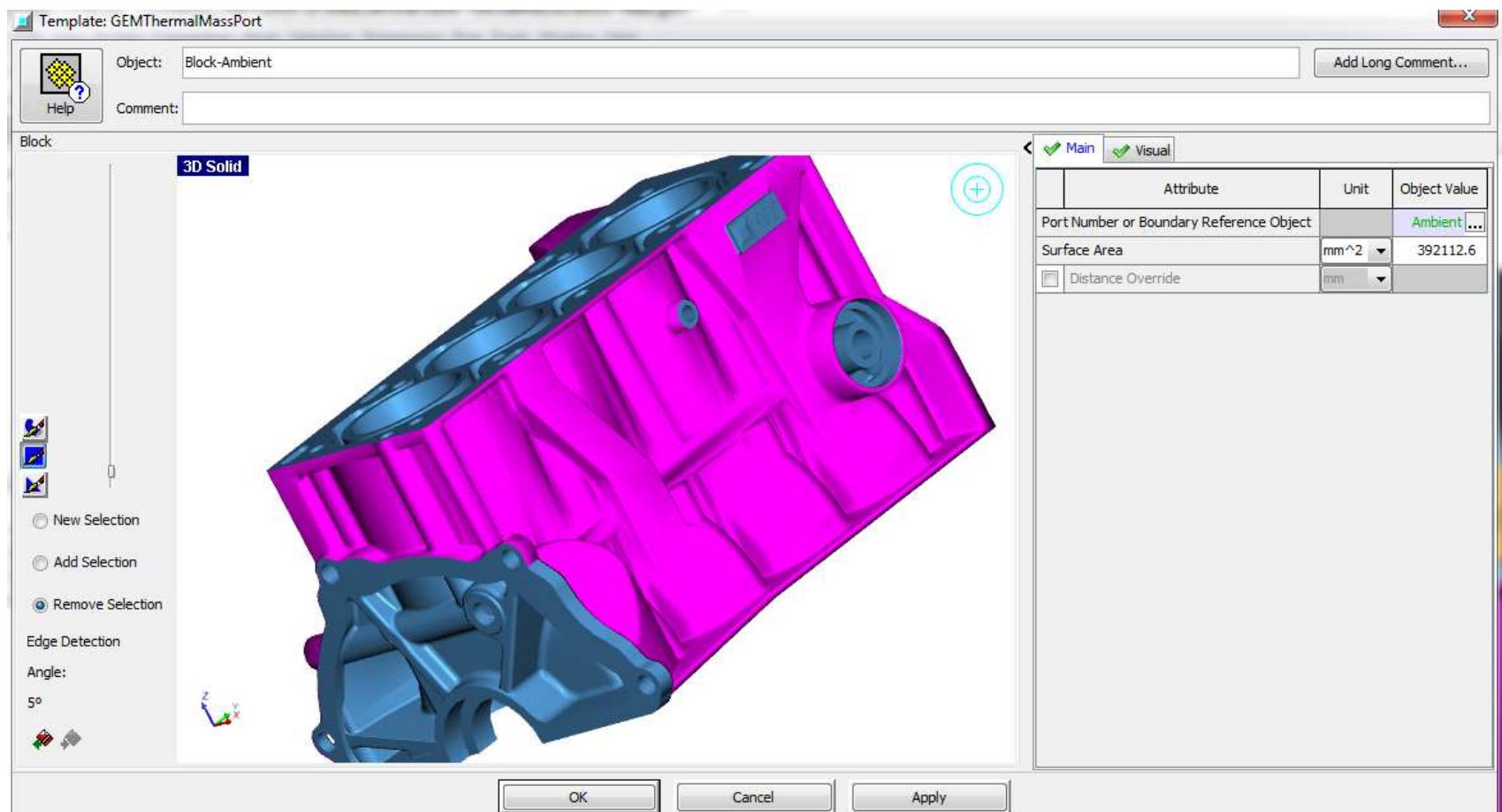
# V7.5 热质量 (GEM3D)

- 创建切割面在转换前或者转换后
  - 实体的子切个面通过热质量体



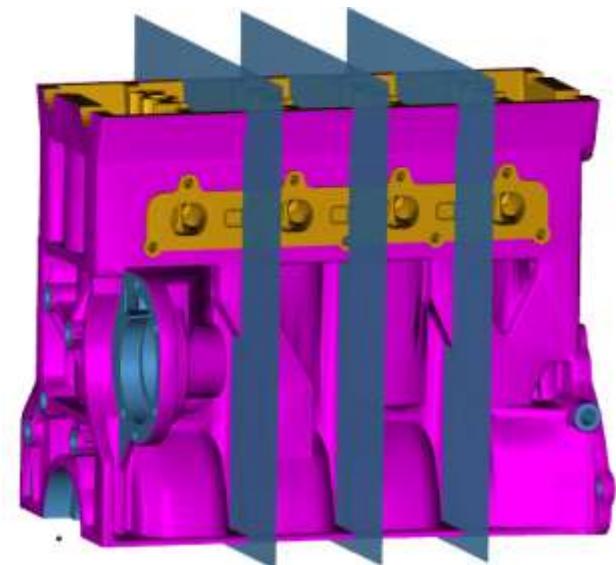
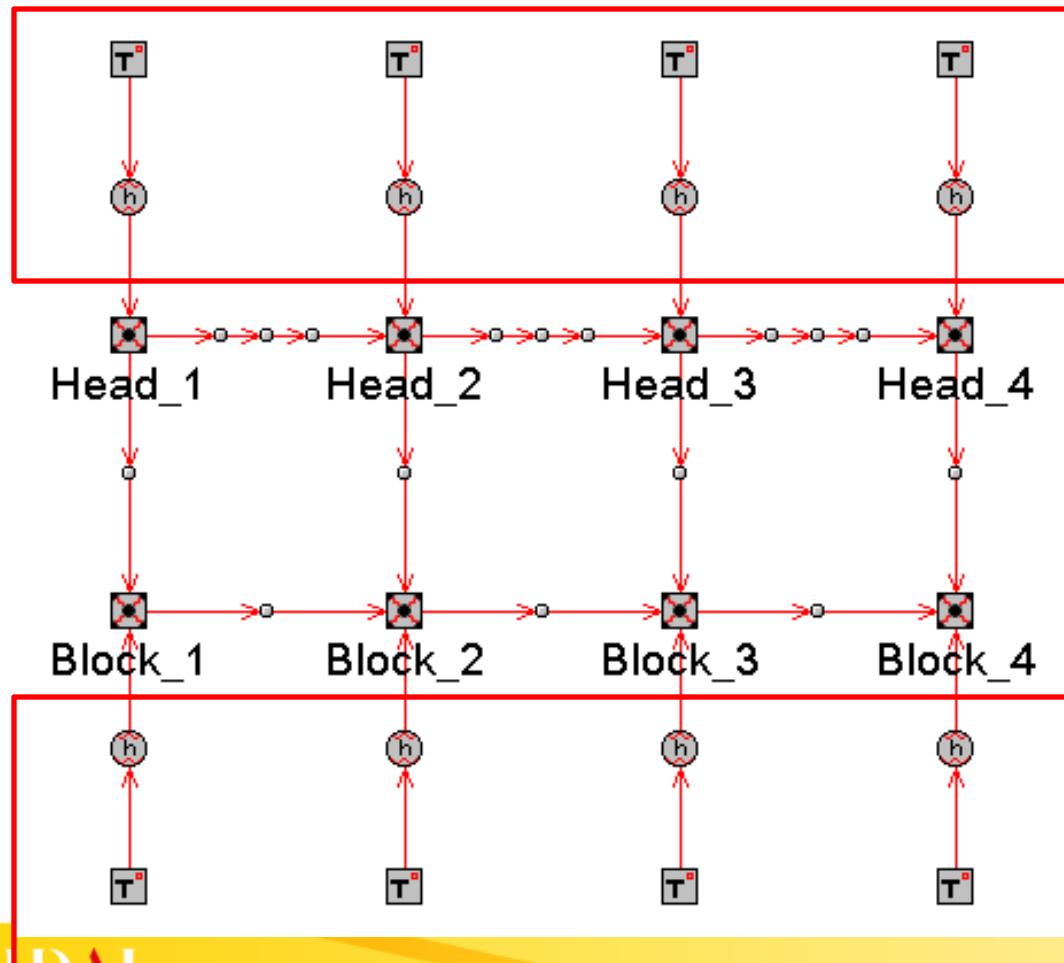
# V7.5 热质量 (GEM3D)

- 在thermal masses表面施加环境的对流边界 (i.e. Ambient convection boundary condition)



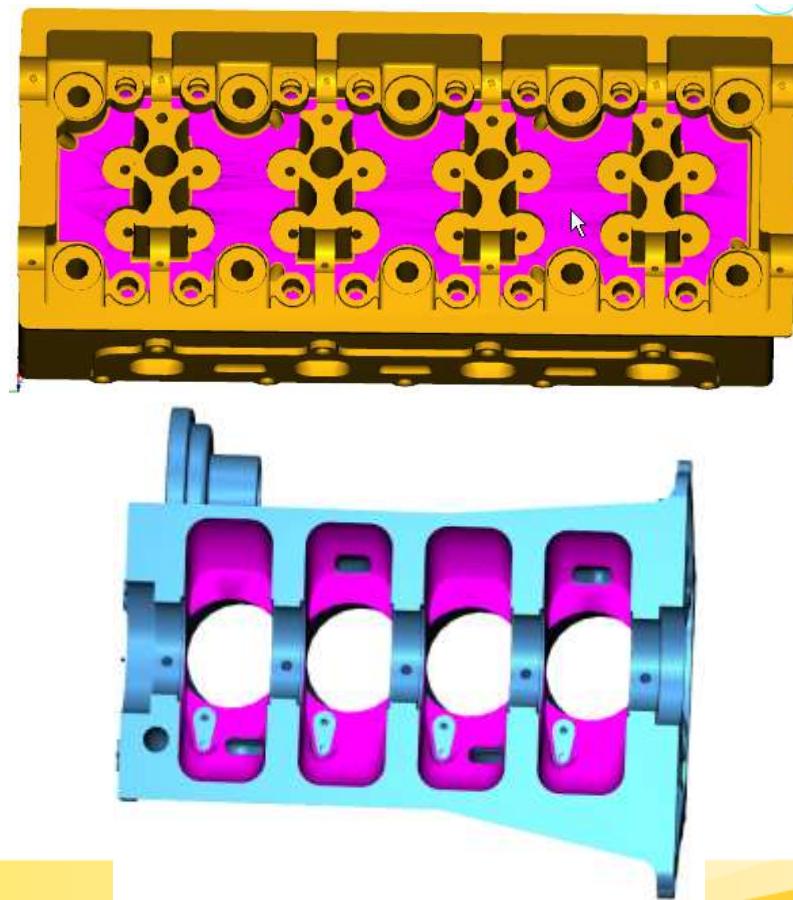
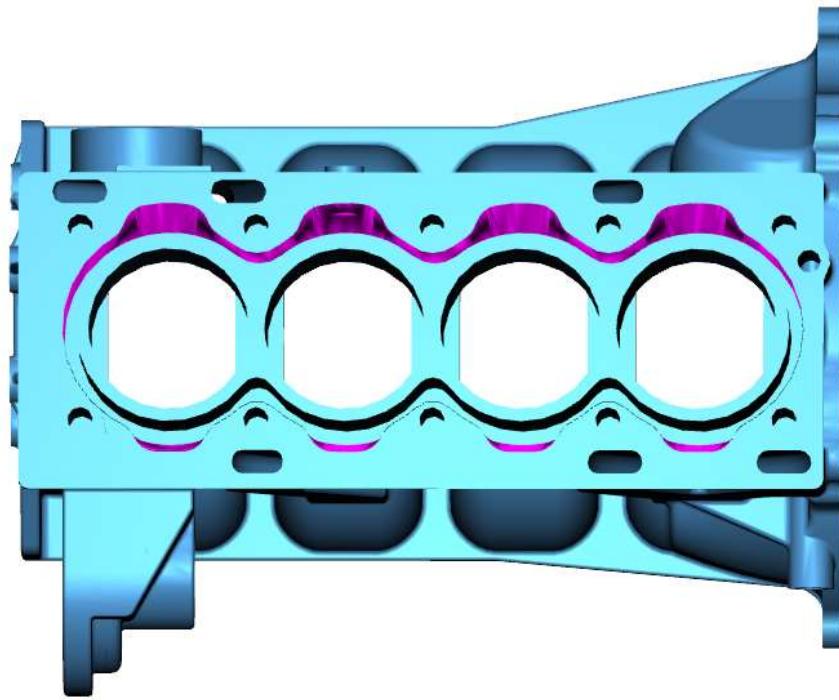
# V7.5 热质量 (GEM3D)

- 自动创造热质量的连接节点和边界条件



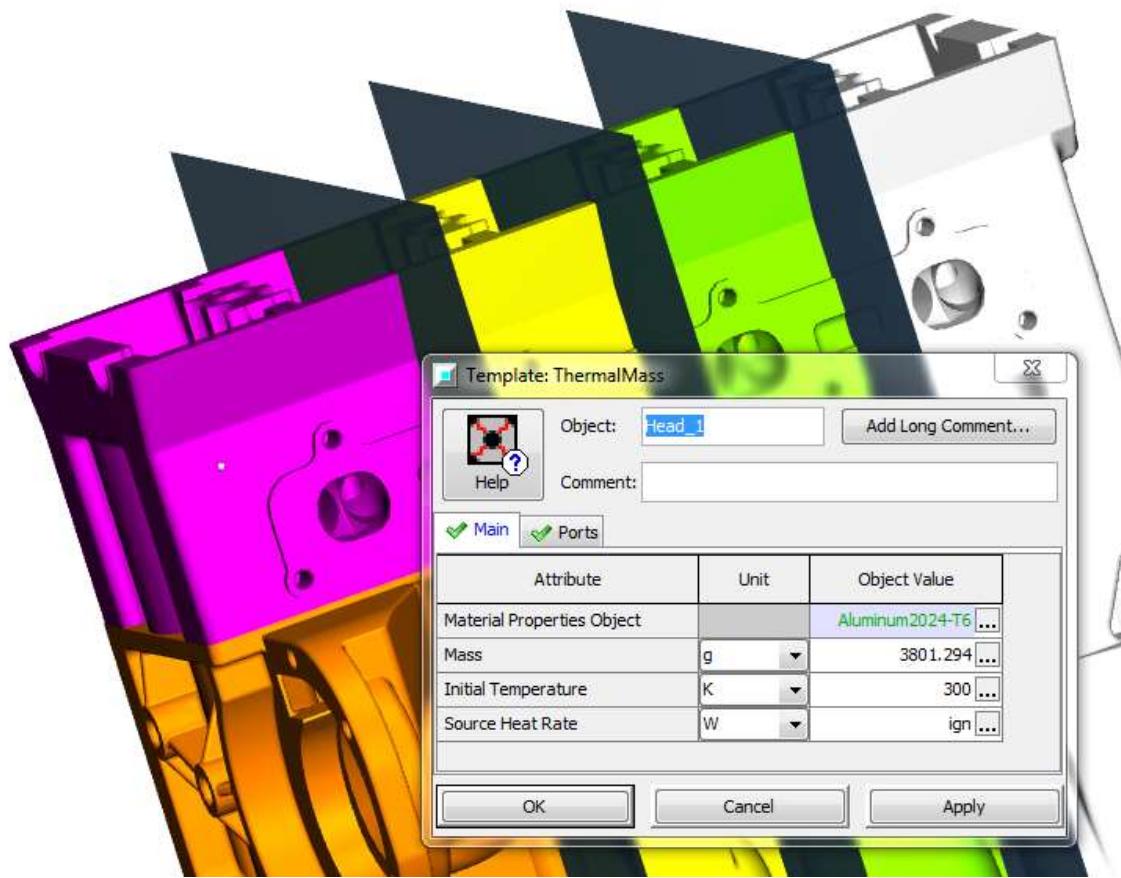
## V7.5 热质量 (GEM3D)

- 标记机体和缸盖来获取冷却液和润滑油的热传面积
- 创建的节点也可以与边界条件或流动体积相连接



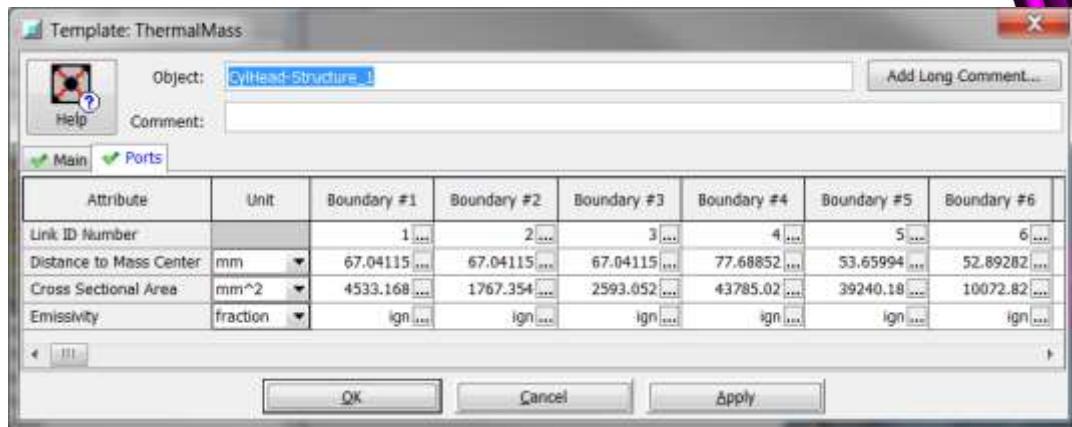
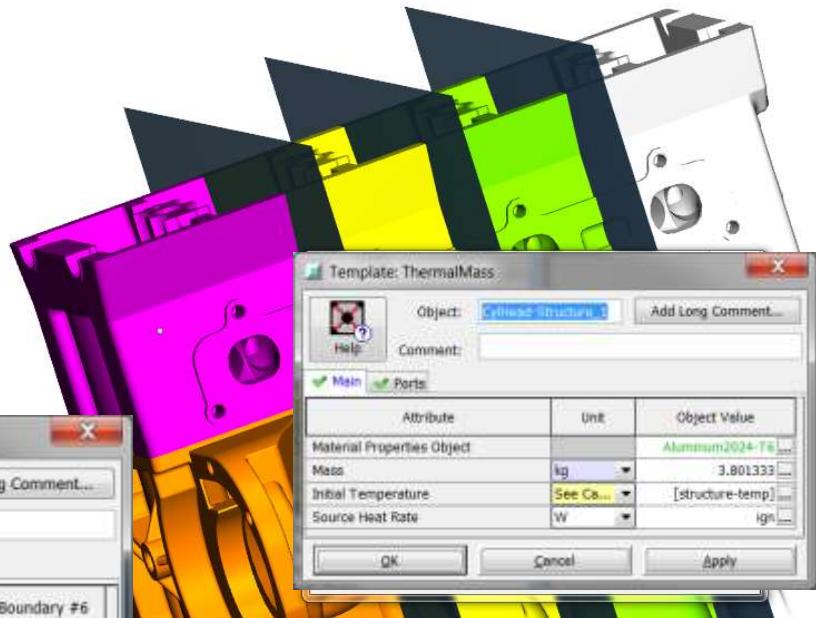
# V7.5 热质量 (GEM3D) - 预览

- 在导出热模型前可以预览或编辑热质量



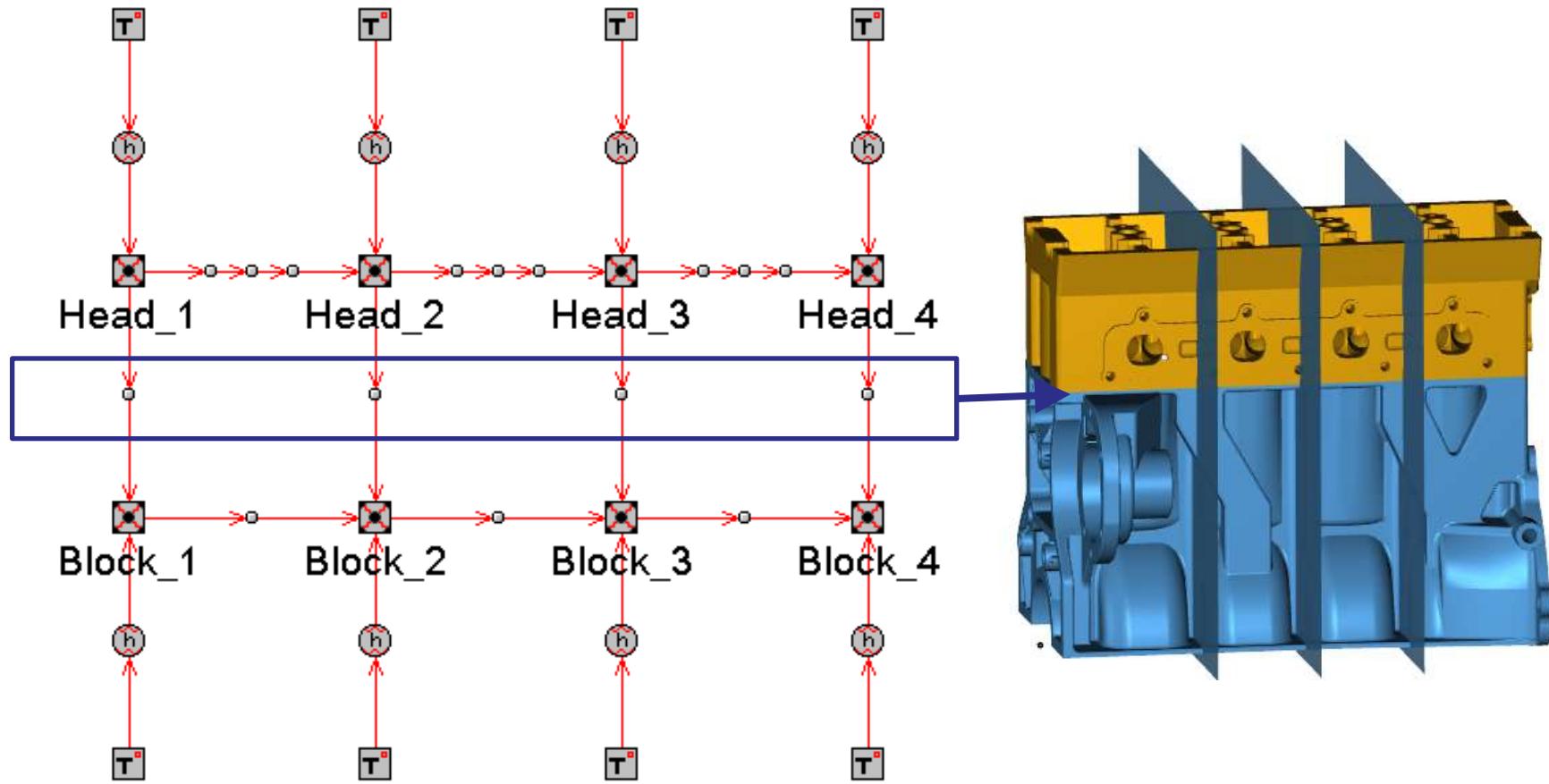
# V7.5 热质量(GEM3D) – 预览

- 之前只是对流动体积可用
- 检测热质量的数目
- 检测接口的数目
- 调整有限元气缸的质量
- 改变名称



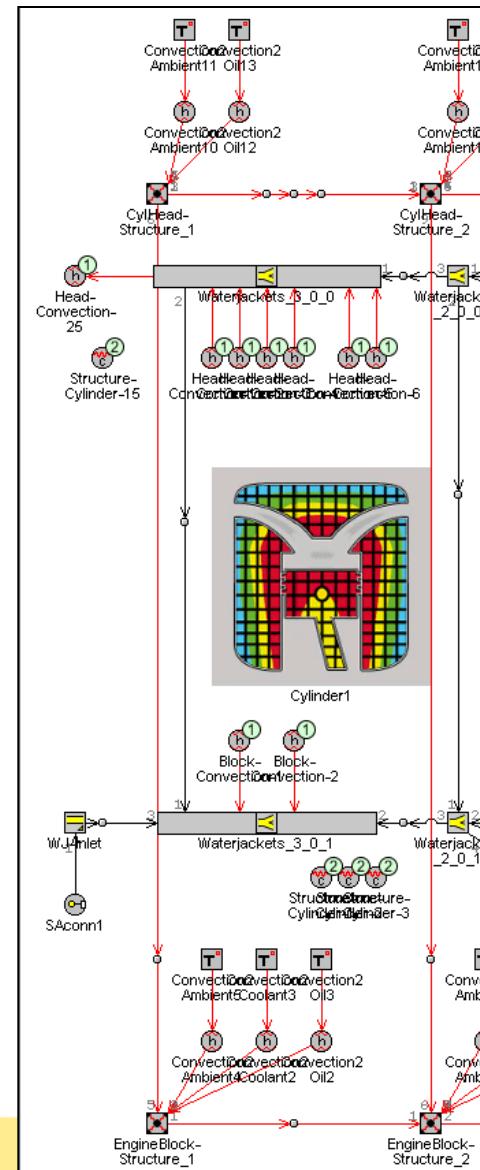
# V7.5 热质量 (GEM3D)

- 自动创建相接触的热质量之间的传热连接



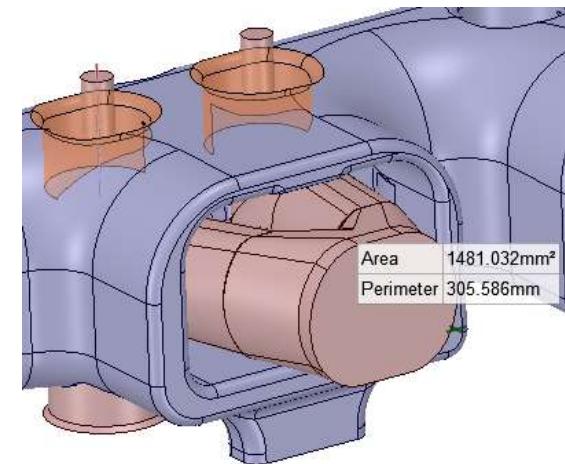
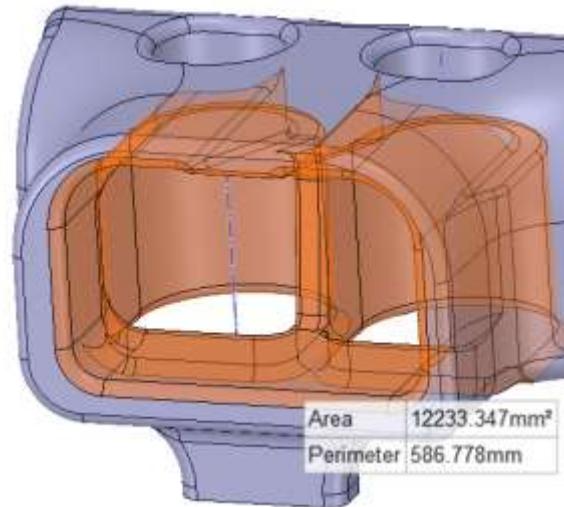
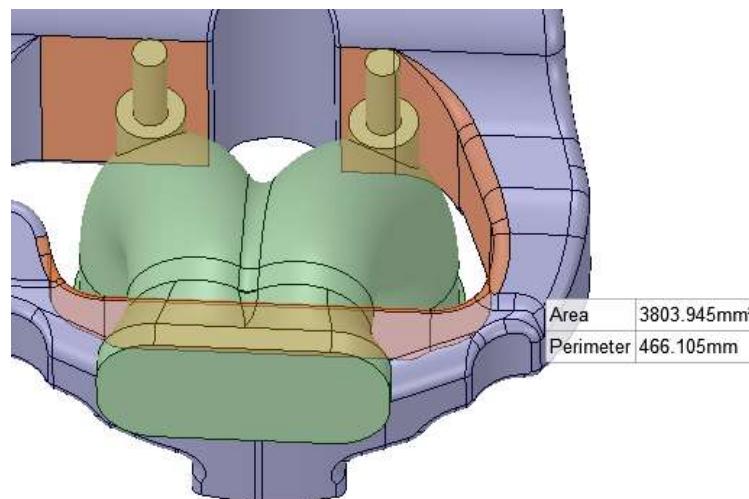
# 装配模型

- 大部分热质量的节点已经被创建
- 额外的热质量节点需要被创建：
  - 缸盖质量
    - 有限元气缸模型
    - 水套
  - 机体质量
    - 有限元气缸模型
    - 距离质量中心的距离作为参数
    - 横截面积需要被确定
- 对流和热传导连接：
  - 缸盖机体与水套
  - 缸盖机体质量与有限元气缸
  - 水套与有限元气缸



# 与有限元气缸的对流连接

- 由于有限元气缸的缸盖和气道的简化，一些热传面积需要靠CAD测量决定
  - 进气道与冷却液接触面积
  - 排气道与冷却液接触面积
  - 排气阀杆与冷却液接触面积



# 增加缸盖质量的节点

---

缸盖与冷却液的对流连接

- 质量中心的距离
  - Calibration lever, create a Parameter
  - 截面积
  - 总面积减掉阀杆的传热面积剩余面积为冷却液面积

Head Surface	Cylinder 1	Cylinder 2	Cylinder 3	Cylinder 4
Total Flowsplit Area	39187.66	36616.46	36613.79	42120.54
Port & Guide Area (measured out)	17518.33	17518.33	17518.33	18060.7
Remaining Area	21669.33	19098.13	19095.46	24059.84

# 增加到缸盖与机体热质量元的连接

缸盖、机体与有限元气缸的热传连接

➤ 质量中心的距离

■ 标定参数

➤ 截面积

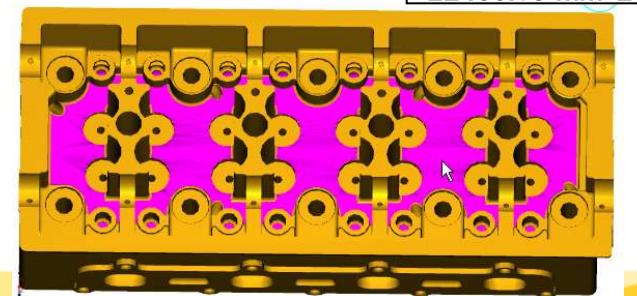
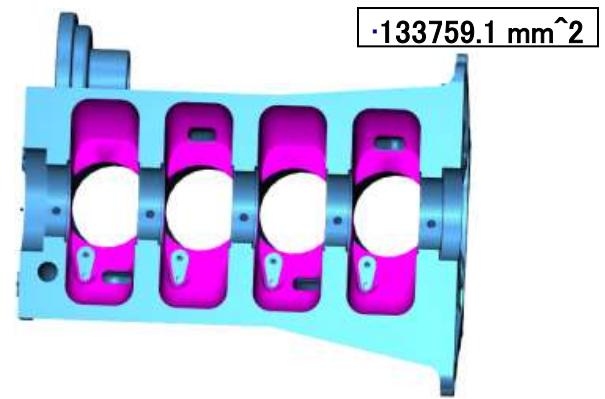
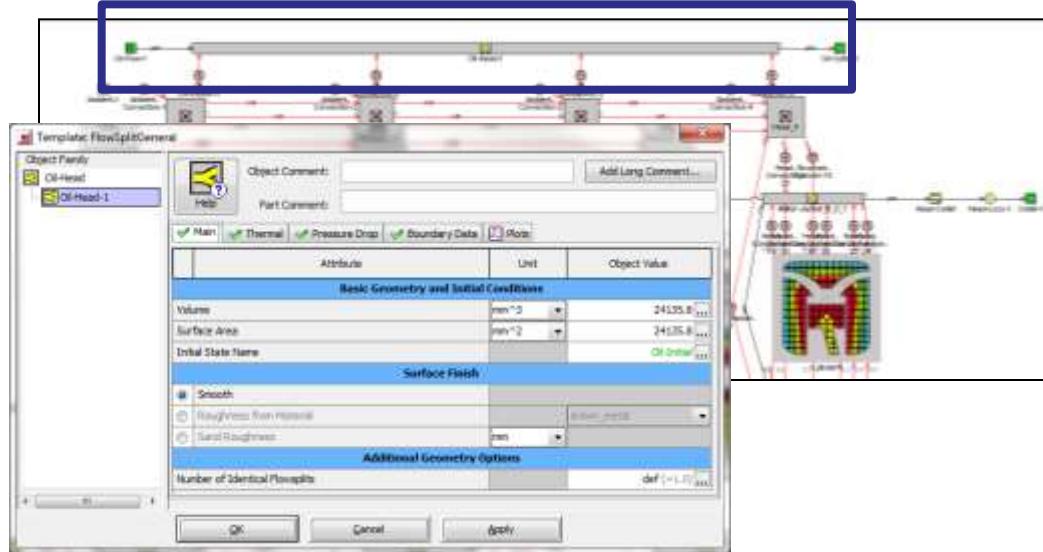
■ 从有限元气缸的后处理结果中决定

Case:	1	Plots	Case RLT	Time RLT	RLT vs Part	Attributes	X-Axis	Y-Axis	Grid	Plot	Print
							3500 RPM Case # 1	2000 RPM Case # 2			
►	Conduction (Structure-Structure)										
►	Liner, Gas-Side										
►	Liner, Coolant-Side										
►	Head										
►	Head Coolant Side Heat Trans. Rate	W	-2431.2642	-1250.9944							
►	Head Coolant Side Temp	K	427.63162	395.76028							
►	Head Coolant Side Surface Area	mm <sup>2</sup>	3617.918	3617.918							
	Head Coolant Side Surface Area										
►	Total Head to Coolant Heat Rate (ind valve seats)	W	--	--							
►	Total Head Gas Side Heat Trans. Rate	W	2329.7776	1140.7362							
►	Head Zone 1 Gas Side Heat Trans. Rate	W	1336.681	652.26373							
►	Head Zone 2 Gas Side Heat Trans. Rate	W	760.35657	374.15387							
►	Head Zone 3 Gas Side Heat Trans. Rate	W	232.73987	114.31867							
►	Head Zone 1 Gas Side Heat Trans. Rate (conv)	W	1336.681	652.26373							
►	Head Zone 2 Gas Side Heat Trans. Rate (conv)	W	760.35657	374.15387							

Case:	1	Plots	Case RLT	Time RLT	RLT vs Part	X-Axis	Y-Axis	Grid	Plot	Print
						3500 RPM Case # 1	2000 RPM Case # 2			
►	Thermal Port 8 Outer Surface Temp	K	373.30206	368.75708						
►	Water Jacket 1 Surface Area	m <sup>2</sup>	0.011997085	0.011997085						
►	Water Jacket 2 Surface Area	m <sup>2</sup>	0.011997085	0.011997085						
►	Thermal Port 1 Surface Area	m <sup>2</sup>	--	--						
►	Thermal Port 2 Surface Area	m <sup>2</sup>	--	--						
►	Thermal Port 3 Surface Area	m <sup>2</sup>	0.005963191	0.005963191						
►	Thermal Port 4 Surface Area	m <sup>2</sup>	0.005963191	0.005963191						
►	Thermal Port 5 Surface Area	mm <sup>2</sup>	3199.2227	3199.2227						
►	Thermal Port 6 Surface Area	mm <sup>2</sup>	3199.2227	3199.2227						
►	Thermal Port 7 Surface Area	mm <sup>2</sup>	1590.1842	1590.1842						
►	Thermal Port 8 Surface Area	mm <sup>2</sup>	1590.1842	1590.1842						
►	Head									
►	Piston									
►	Valve Face									
►	Valve Back									
►	Valve Ports									
►	Valve Guides									

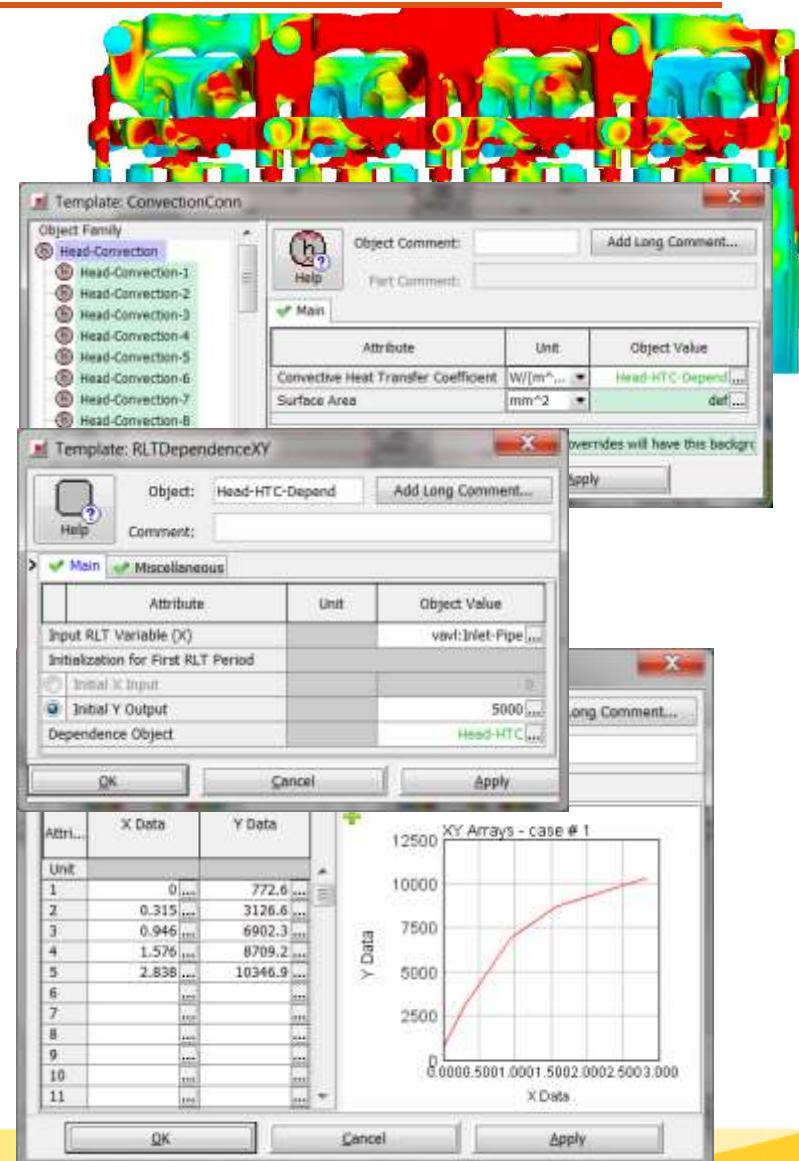
# 润滑油体积

- 增加机体与缸盖的润滑油体积
- 油的体积可以根据测量的接触面积与1mm的油膜厚度决定
- 对流传热系数假设为400 W/m<sup>2</sup>K
- 忽略机体缸盖上面的钻孔的传热面积



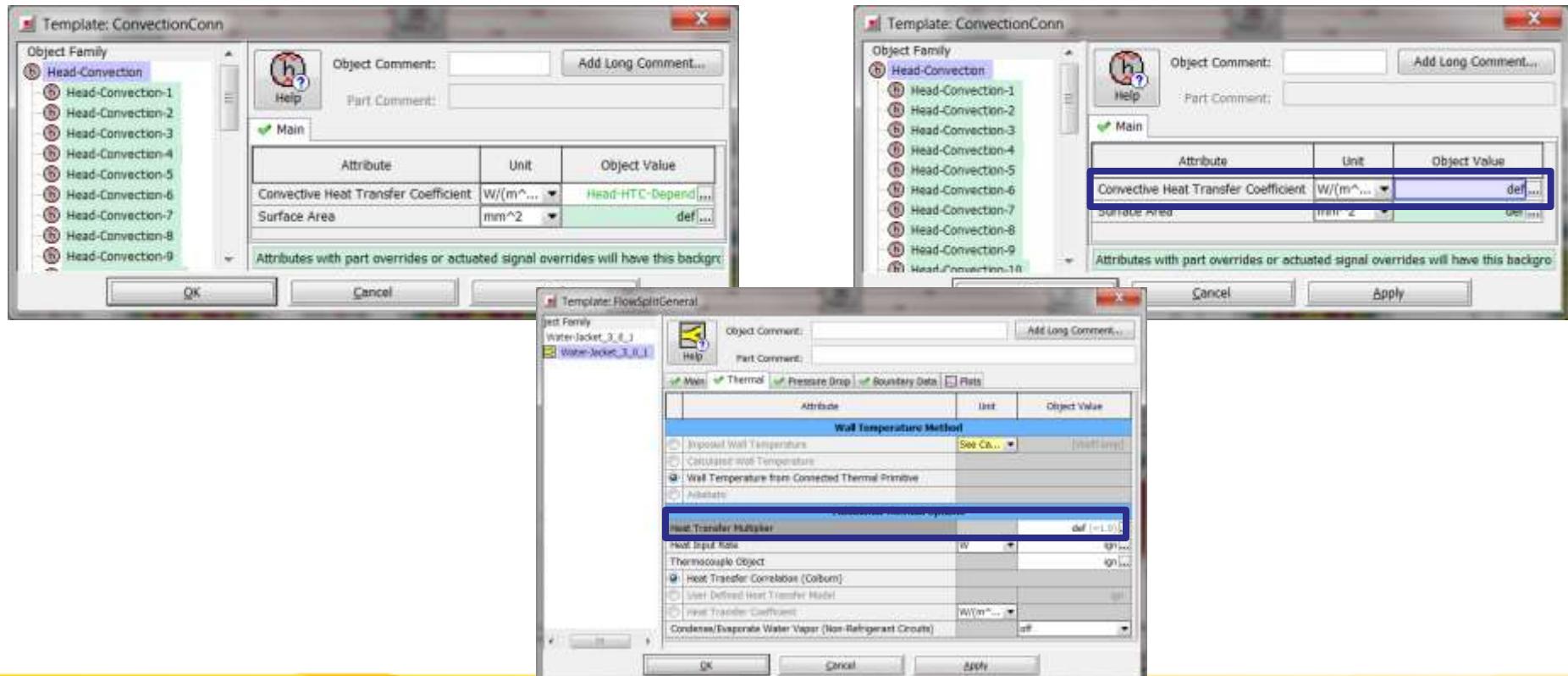
# 对流传热系数

- 从CAD获取冷却液与结构的传热面积
- 标准管路求解通过低估水套的传热系数
- 传热系数通过CFD计算结果获取
  - 对每一个分叉管施加面积平均的对流换热系数值或者对整个机体缸盖施加一个平均值
- 对流换热系数依赖于发动机进口的冷却液流量，至少两个点



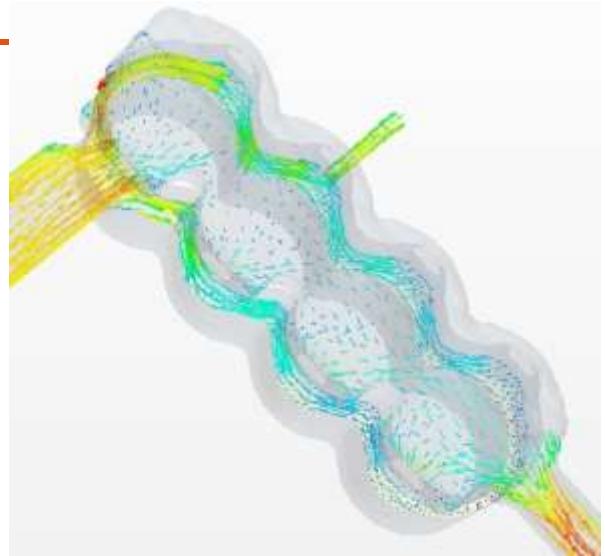
# 对流传热系数

- 通常反馈：CFD计算结果可得
- 如果CFD结果不可得，采用默认的管路分析对流换热系数同时结合热传系数因子进行调整匹配传热量



# 模型标定

- 3维流动的流场在1维模型中得不到
- 3维流动效果会影响压降与热传的计算
- 因此需要标定传热和压降

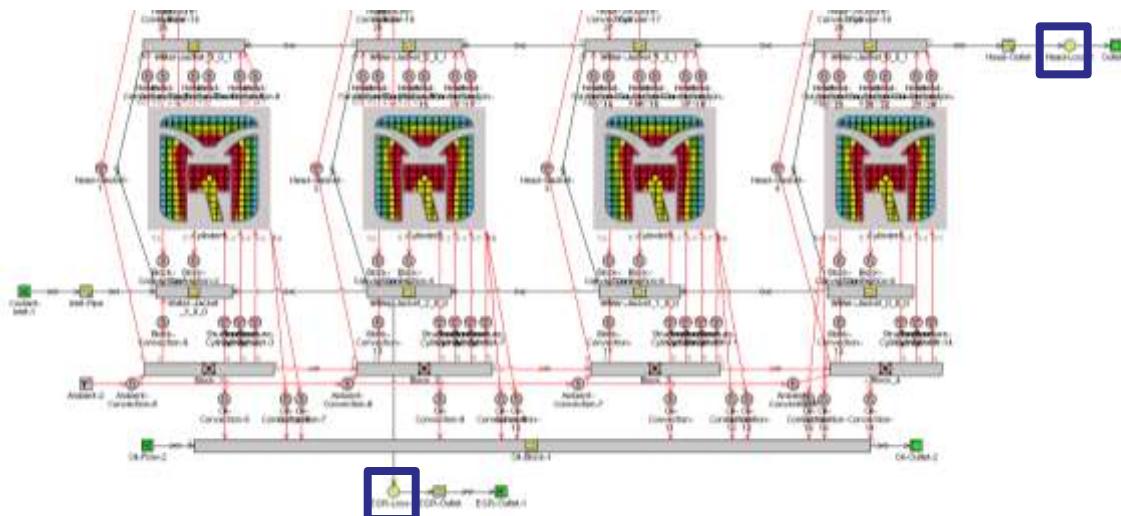


- 采用下面的数据进行模型标定：
  - 压降与流量的曲线从进口到各个出口
  - 热传系数与流量的关系
  - 冷却液、机油与环境的热传率
  - 机体与缸盖的最高金属温度
- 如果不是所有的数据都有，标定需要一些假设推断

# 压差标定

## 方法：

- 保持分叉管内的压力损失最小 (friction multiplier set to zero)
- 基于测试结果施加进出口的边界条件 (Test-Bench environment)
- 在出口施加测量到的压降数据 (FlowPDropTableRef)
- 如果测试数据点非常少，建议采用FlowPDropLossCoeff去匹配目标压  
力，采用直接优化的方法



# 压力标定

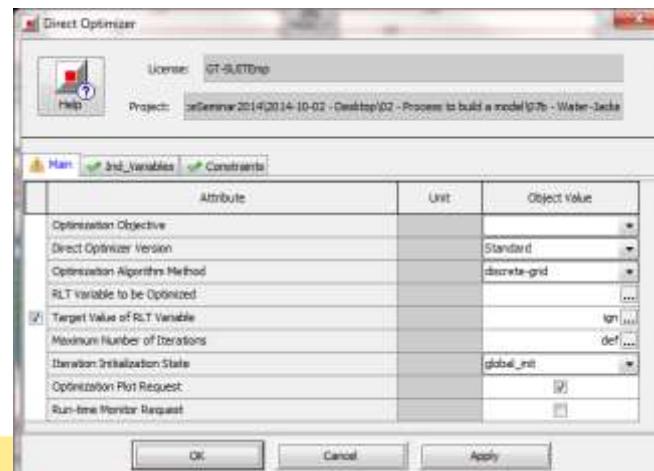
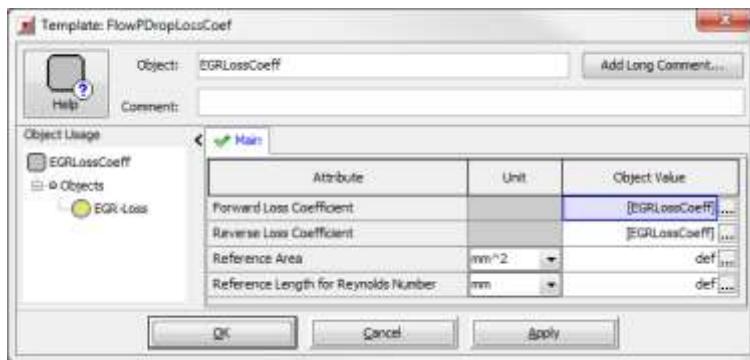
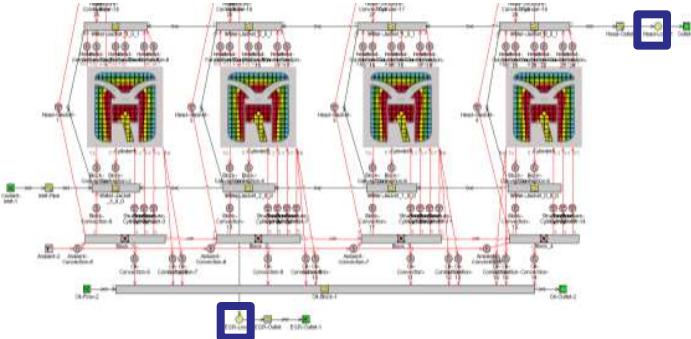
采用内置的直接优化进行压力损失系数的优化

## ■ 施加：

- 发动机进口和EGR出口的体积流量
- 缸盖出口压力

## ■ 目标：

- 发动机进口和EGR出口压力
  - 缸盖出口流量
- 
- 最小二次方来使计算值与试验值偏差最小

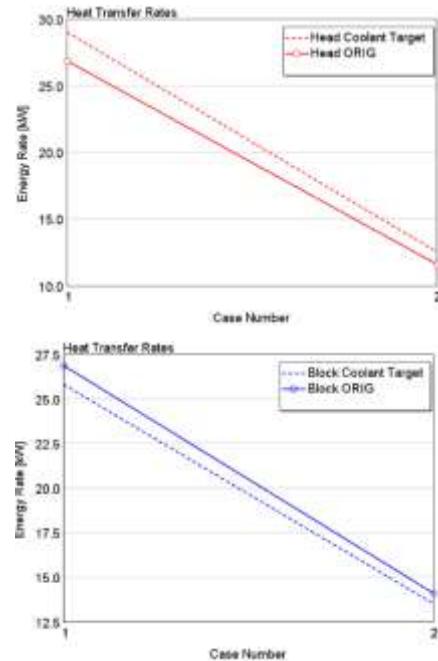
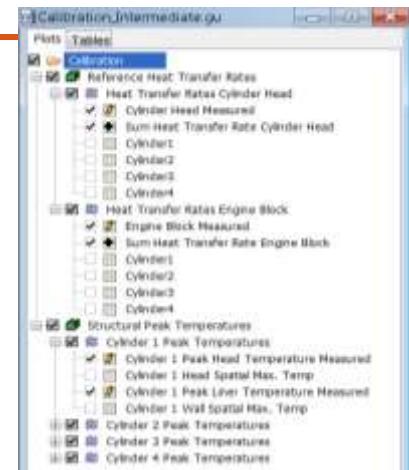


---

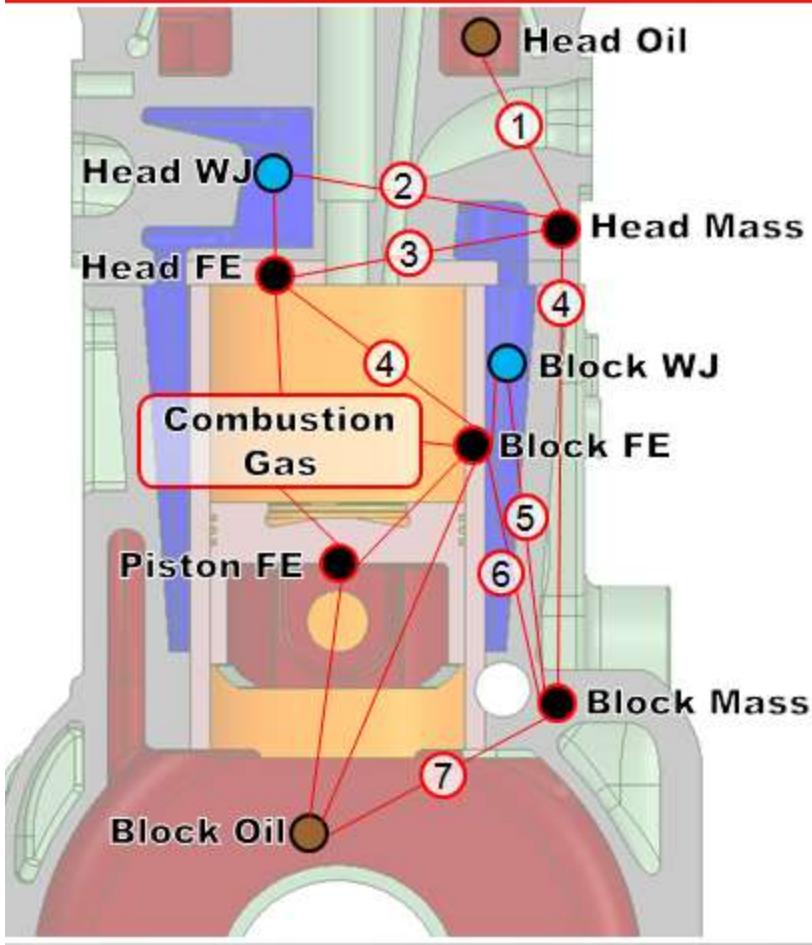
# 传热标定

# 热标定

- 复制3维的CFD结果到GT模型
  - 施加油温以及燃烧气体的边界条件
- 热传系数基于CFD计算结果
- 热传面积来自于CAD数据
- 方法：
  - 标定通过结构的热传阻力来匹配CFD的传热率以及壁面温度结果
  - 标定变量：
    - 到质心的距离
    - 缸盖垫片的热传阻力来匹配缸盖与机体之间的热传率



# 热系统简图

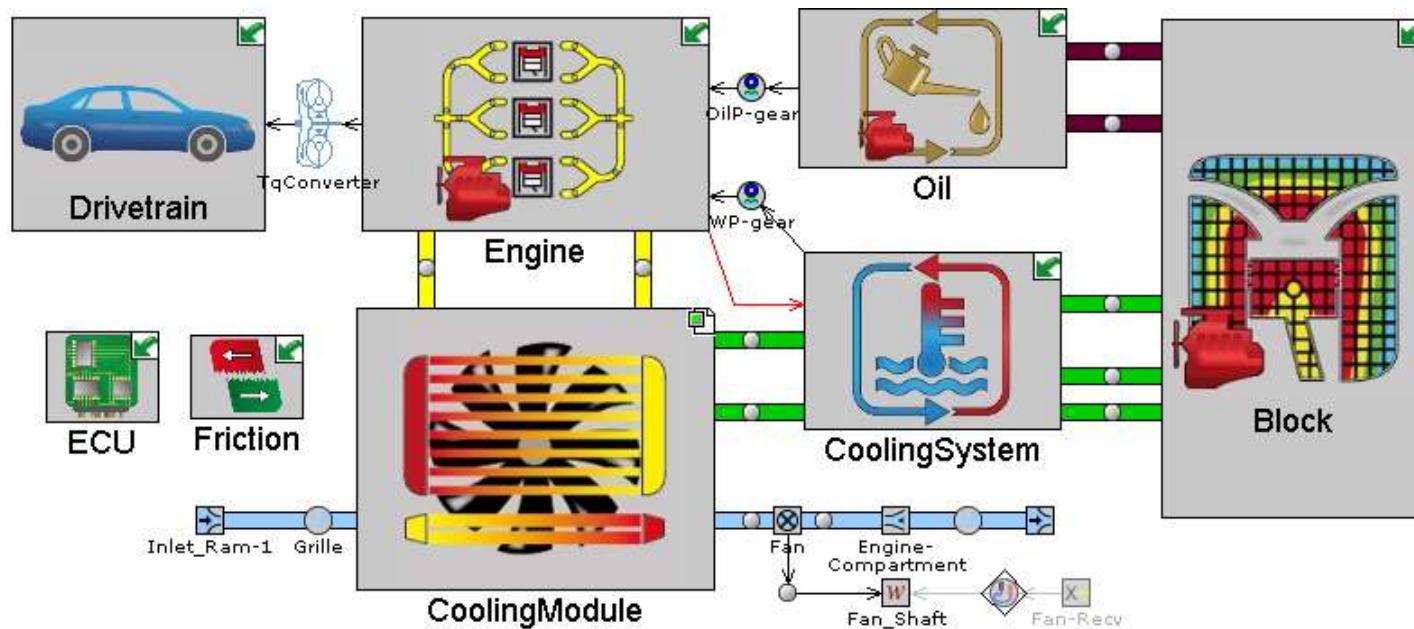


## 标定参数

1. 缸盖到润滑油的距离
2. 缸盖到冷却液的距离
3. 缸盖到结构有限元的距离
4. 气缸垫热阻 Resistance
5. 机体与冷却液距离
6. 机体到缸套的距离
7. 机体到润滑油的距离

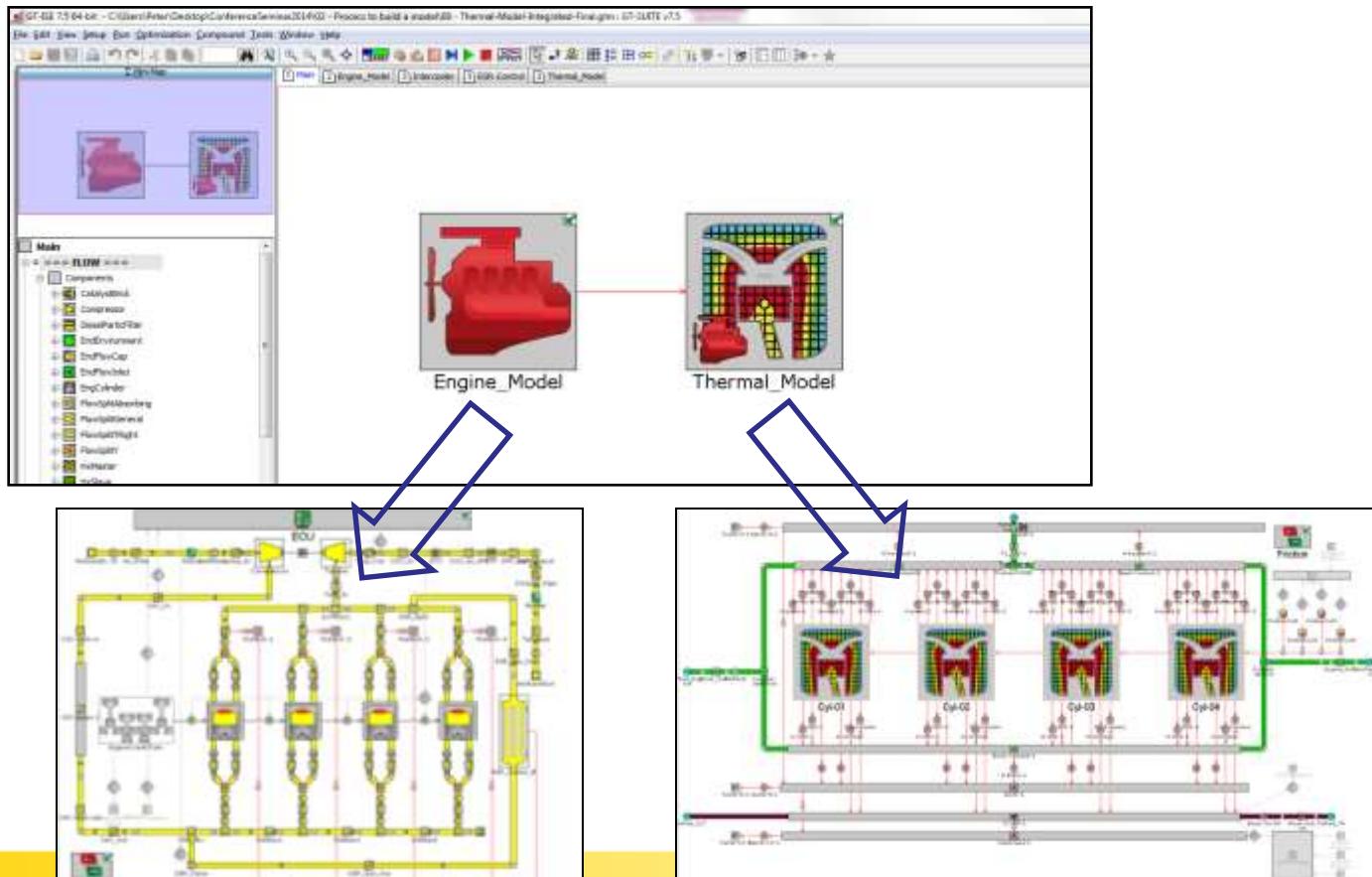
# 耦合的发动机热分布模型

- 一旦与CFD结果进行标定，发动机热分布模型就可以用于系统耦合
  - Connect FE 连接有限元模型到气体边界gas
  - 连接水套到冷却系统
  - 连接油路到润滑系统
  - 摩擦功



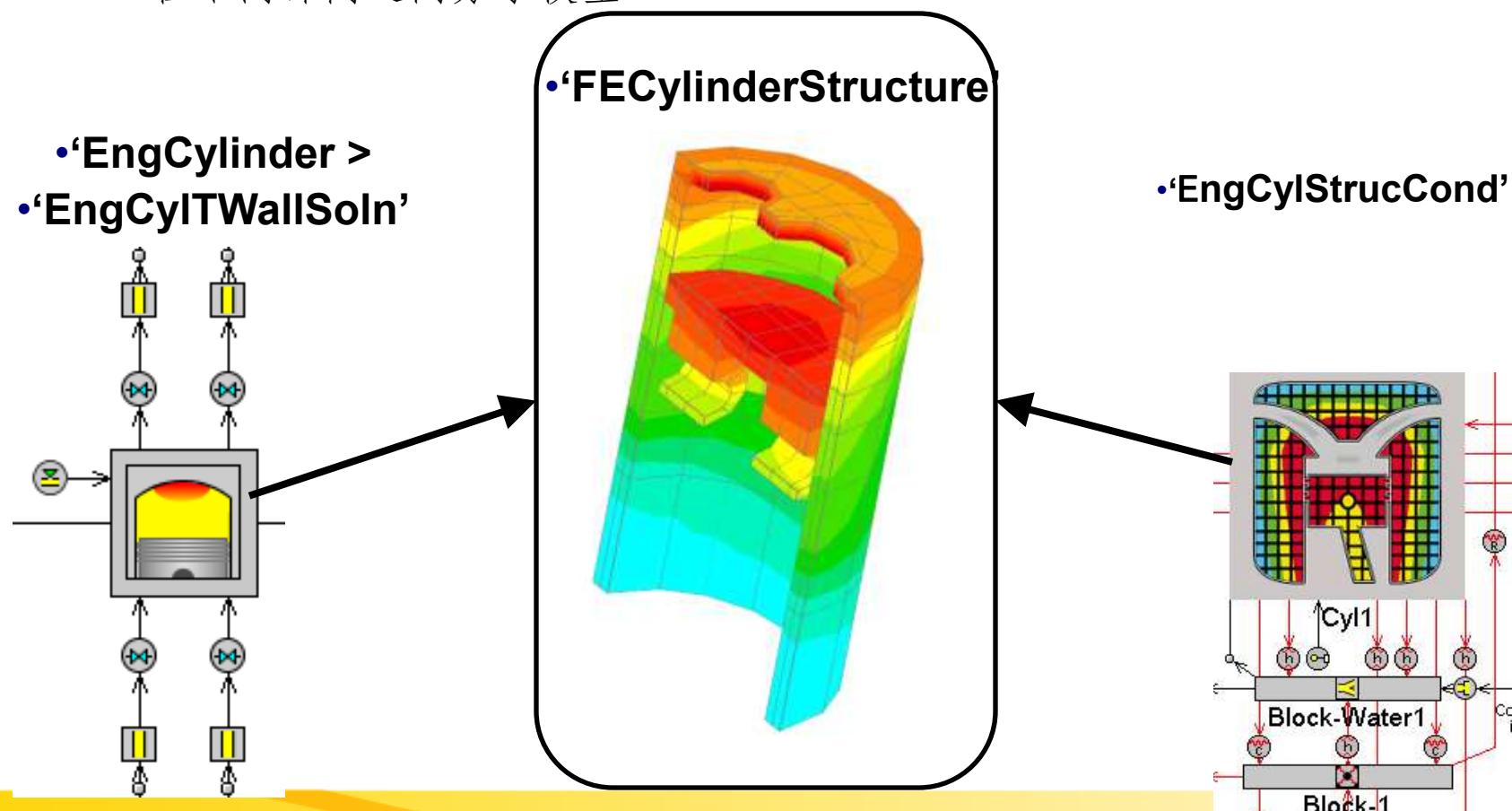
# 增加发动机模型

- Connect 连接气体与结构侧模型
- 调整气门的开启时刻和结构在 EngCylStrucCond 中
- 连接EGR冷却器



# V7.5 有限元气缸结构

- 有限元气缸结构在发动机和冷却模型之间共享
  - 从发动机模型中更容易建立冷却模型
  - 在不同部门之间分享模型



# 添加摩擦热

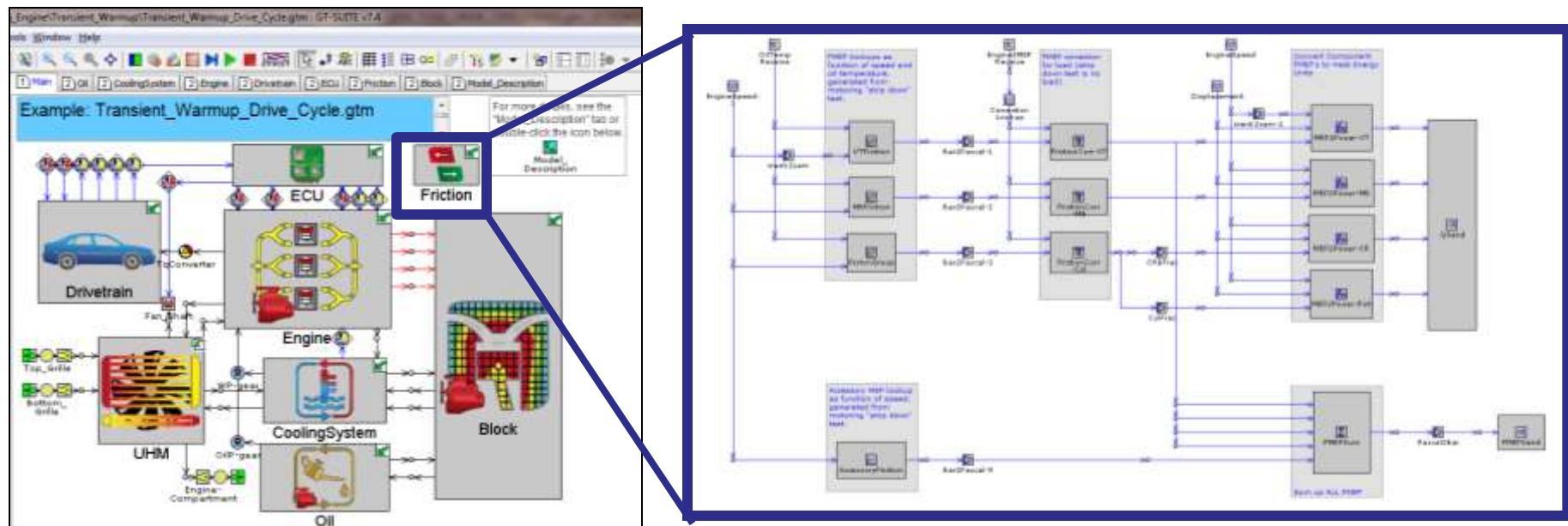
---

## ■ 测试

- 在不同转速和水温下做倒拖试验
- 逐步拆除零部件做部件的摩擦试验
  
- 经验校正模型
- Chen-Flynn方程
  - $f(\text{peak cylinder pressure, mean piston speed})$
  - 通过添加RLTdependence使之依赖于温度
- Schwarzmeier/Reulein – diesel engines
  - $f(\text{RPM, BMEP, Oil Temp, Coolant Temp})$
  - Inputs are RPM, BMEP, FMEP, Coolant Temp, Oil Temp, and Cylinder Wall Temp for one reference point, plus piston stroke and main/conrod bearing diameters
- Fischer – gasoline engines
  - $f(\text{RPM, BMEP, Oil Temp, Coolant Temp})$
  - Inputs are RPM and Measured FMEP for two reference points (no load, hot engine)

# Adding Friction Heat

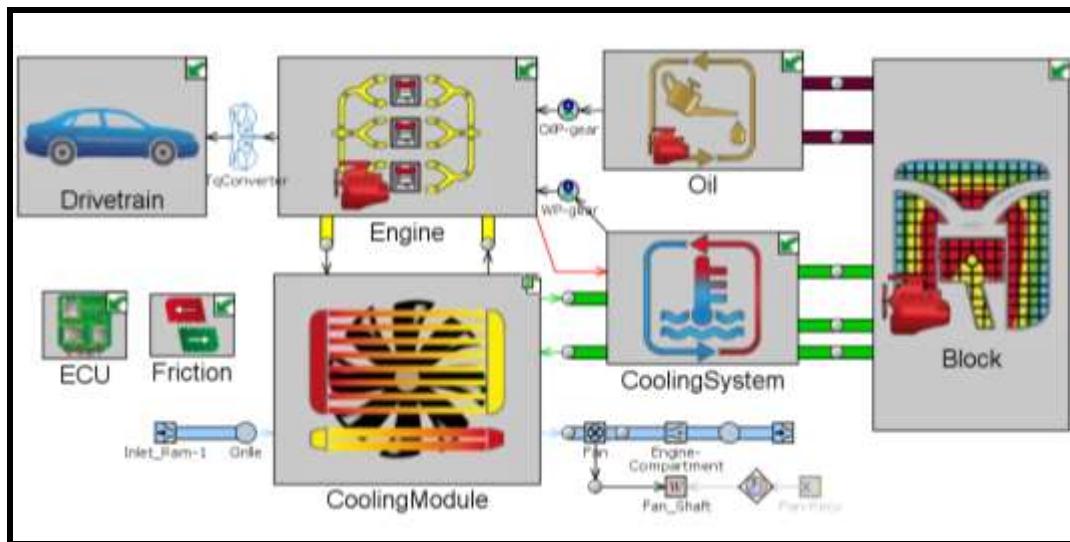
- 测试 ("Strip Tests")
    - 在GT模型中用控制施加
    - 基本设置在例子中可以得到
    - "Transient\_Warmup\_Drive\_Cycle.gtm"
      - 用测试数据代替例子中的数据with strip tests results



# 增加其余回路

当模拟瞬态工况的时候推荐使用 (eg. warmup) :

- 模拟相关的子系统
- 能够捕捉子系统之间的瞬态联系
- 系统之间快速的数据交互quickly interchangeable
- 模型可以在不同部门间共享



# Run Setup

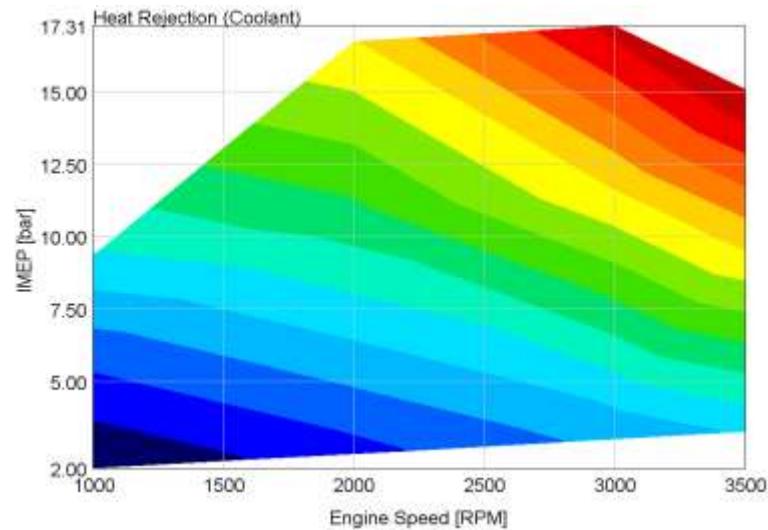
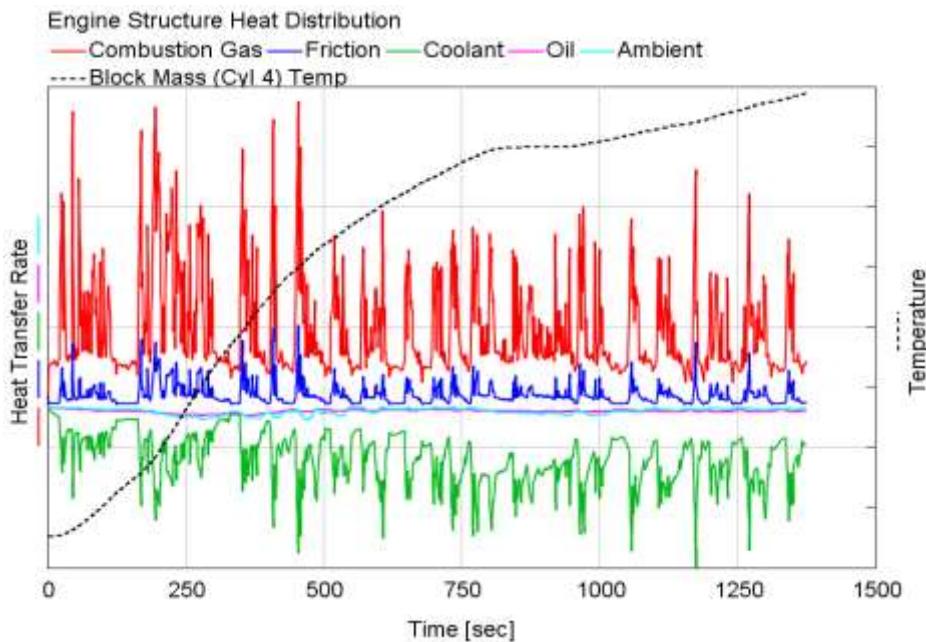
---

- Two Circuits 两个回路存在于模型中 (Engine and Coolant) present in the model
- 依赖于模拟的类型
  - 稳态计算(定转速): 所有的回路都采用周期性步长 隐式回路的步长是曲轴转角, 最大720度
  - 瞬态计算 (变发动机转速): 冷却回路与发动机回路采用不同的时间步长设置来改善计算时间, 冷却采用隐式求解, 步长为秒

	<b>Engine</b>	<b>Coolant</b>
Time Flag	Periodic (° CA)	Continous (sec)
Solver	Explicit	Implicit

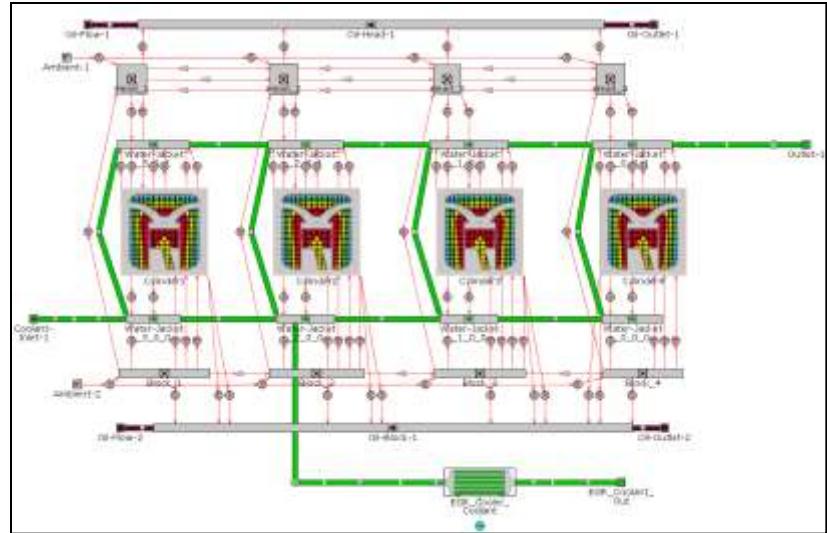
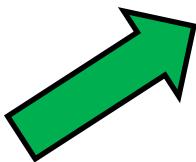
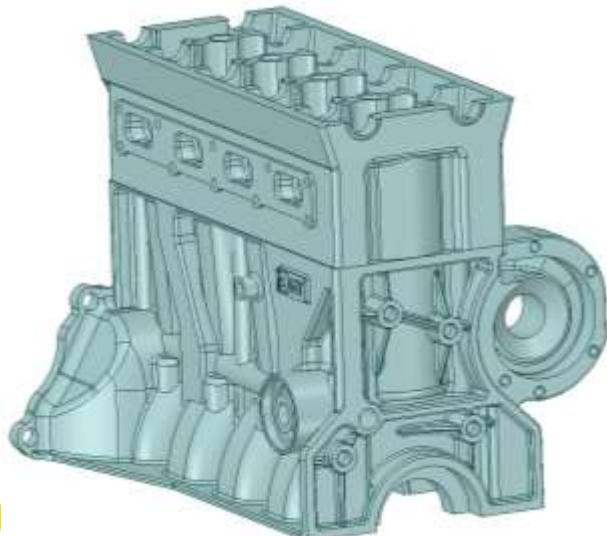
# 结果分析

- 可以预测未测试的工况点的放热量
- 整车驾驶循环中的瞬态分析，例如暖机工况



# V7.5 发动机热分布教材Tutorial

- 位置 Help > Tutorials > Modeling\_Applications > Cooling\_Engine
- 7.5独有



- 一步步的操作介绍
- 提供了发动机模型和几何尺寸

# GT-SUITE 重要特性- 热管理方面

## ■ 流体回路

- 3D CAD转化为1D模型
- 单一的管路模型带有壁面温度求解
  - 与液压系统或热分析完全相同的处理
- 物理现象级的Navier-Stokes求解，既使在流量为0的情况下也有很好的稳定性
- HX比例扩展功能

## ■ 发动机热负荷分布

- 3D前处理工具帮助生成冷却回路系统和热质量
- 参数化的F.E.缸内结构，去预测发动机能量流通过机体的
- 可以与带有预测功能的发动机模型耦合 (GT-POWER)

## ■ 发动机机舱分析

- Quasi-3D Navier-Stokes 求解方法可考虑阻碍物、HX布置、风扇位置
- 在早期开发过程中，预测完整的机舱3D求解
- 一旦有CFD结果Calibrated “只进行模型”修正就可以

## ■ 能量管理

- GT-SUITE是一个“完整”整车系统平台
- 有效获得带有预测功能的 GT发动机模型
- 高效的处理大的模型文件
- 很强的数据管理能力
- 灵活开放的与其它工具的联合仿真平台



谢谢大家！