

## 新能源车用动力电机散热 解决方案

IDAJ-China 技术部



IDAJ-CHINA



IDAJ艾迪捷



- 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。

# 目录

---

- 简介
- 电机分析方案
- 电机冷却方式
- 电机散热分析内容
- 电机散热分析流程
- 2D/3D电磁—热流耦合分析案例
- 1D/3D电机散热分析案例
- 水冷电机散热分析案例
- 油冷电机散热分析案例
- 总结

# 简介

## ■ 新能源车用动力电机发展趋势：

- 功率/扭矩需求越来越大
- 紧凑性要求更高
- 转速、负荷变化范围大
- 效率更高

## ■ 电机冷却系统要求更高

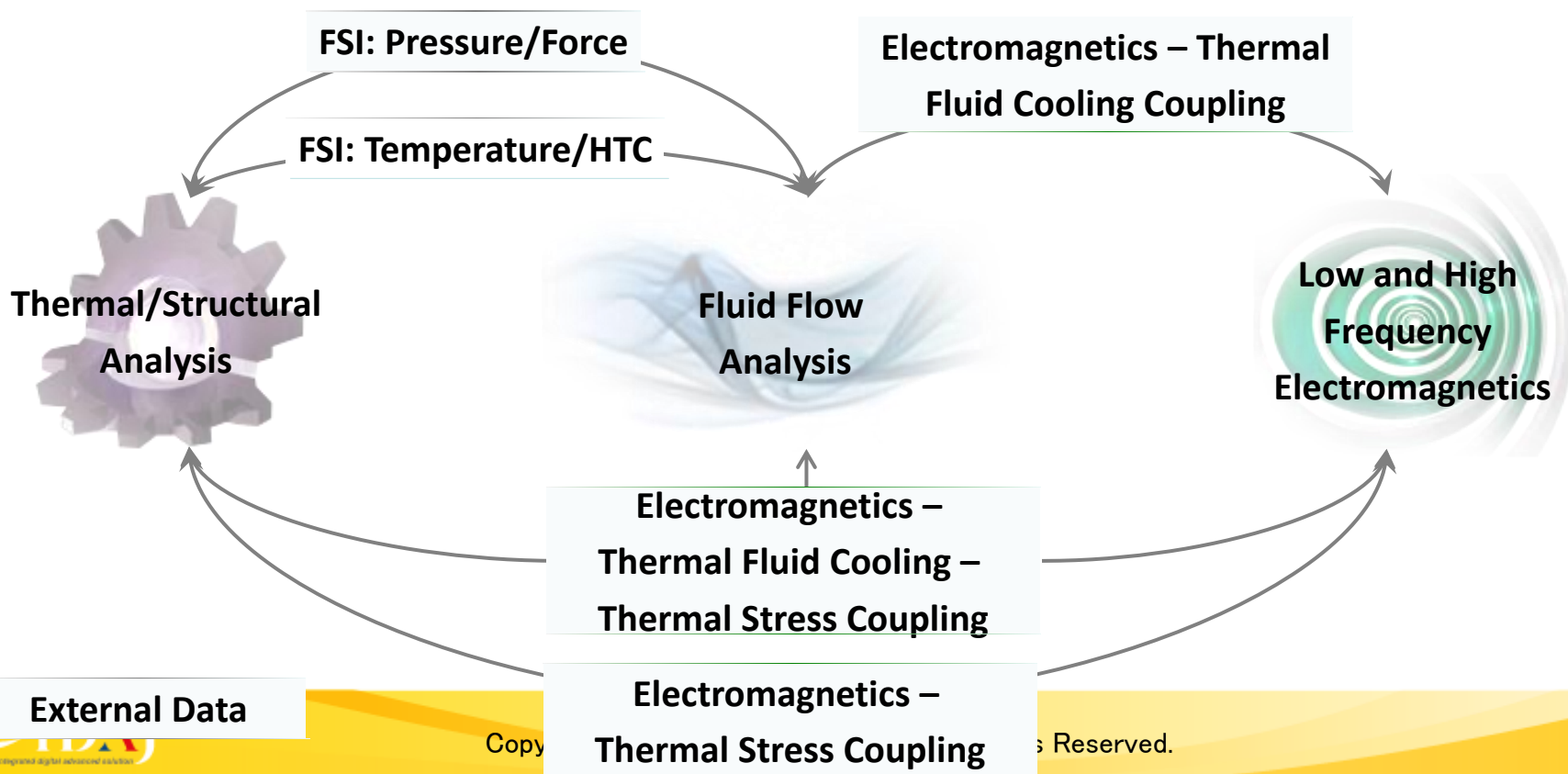
- 不仅稳态工况，更关心瞬态工况
- 转速、负荷差异大，对热要求高
- 单一的稳态分析不满足要求

## ■ 热管理要求

- 长时间、瞬态运行
- 能体现电机内部不同位置热的空间分布与时间分布

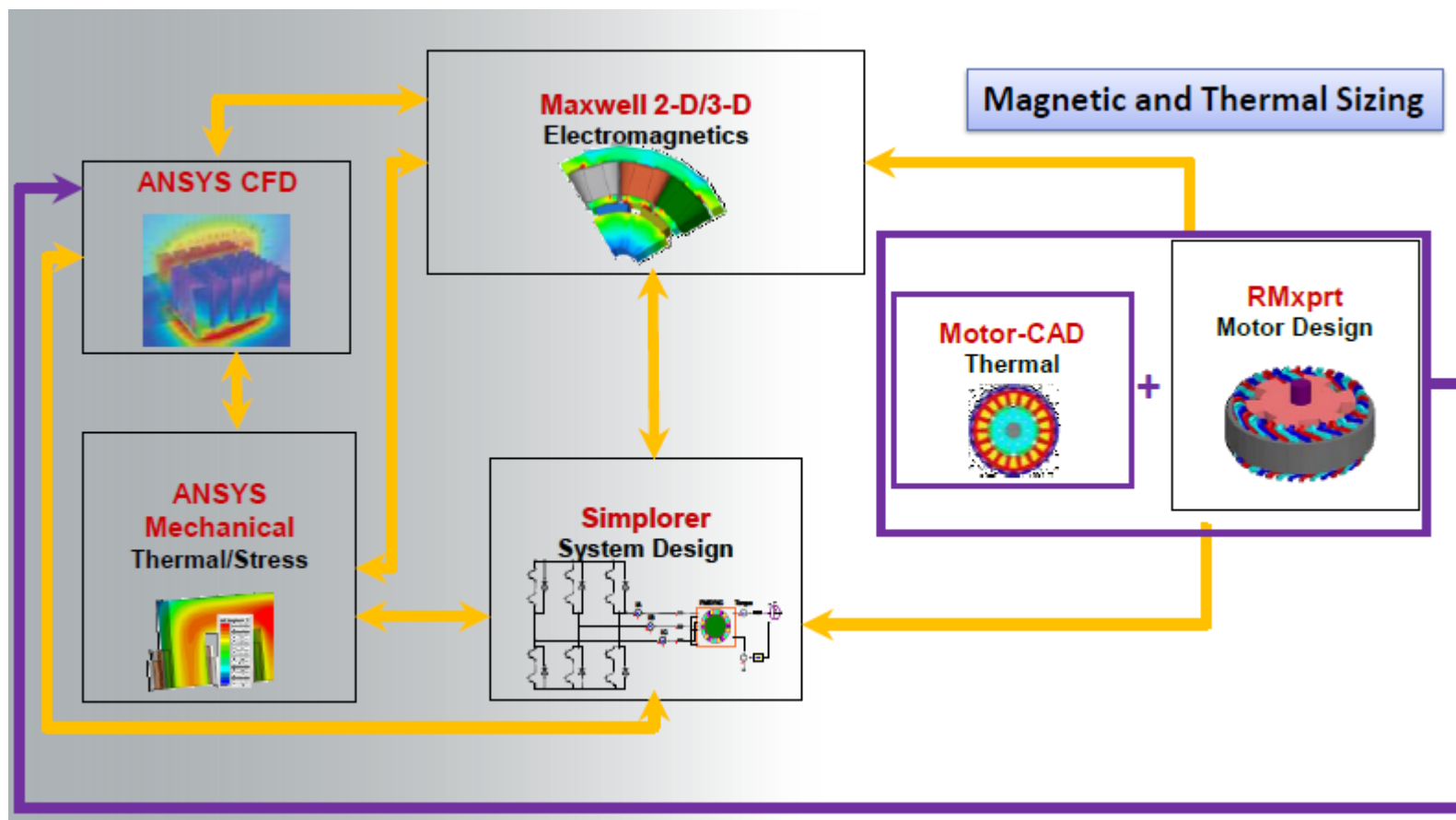
# 简介

- 电机热管理是一种典型多物理学科问题，同时涉及到电磁分析、流场分析、温度分析，以及有限元分析。
- ANSYS 软件包作为一款涵盖多物理学科的综合性产品，可为电机散热分析提供完备的解决方案。



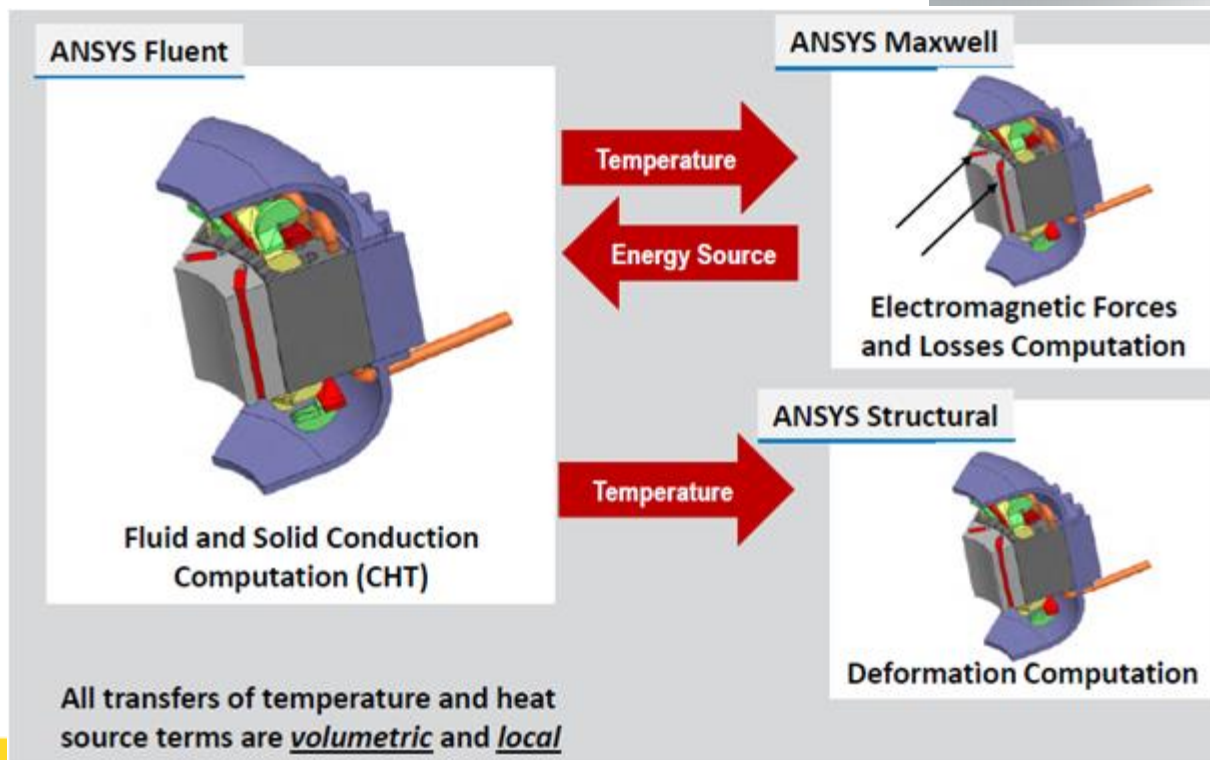
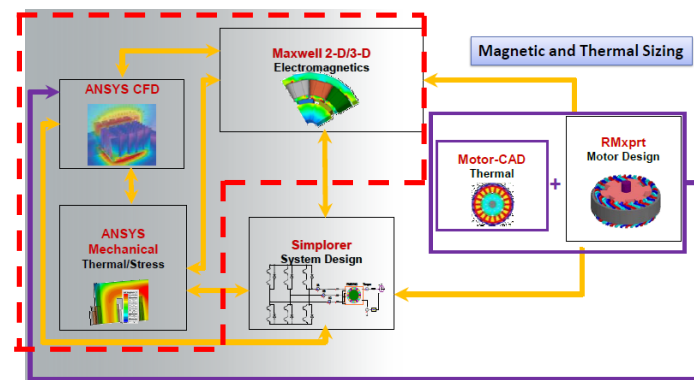
# 电机分析方案

- ANSYS 软件包为电机提供了包含设计—分析—系统性能的完整多物理场方案：



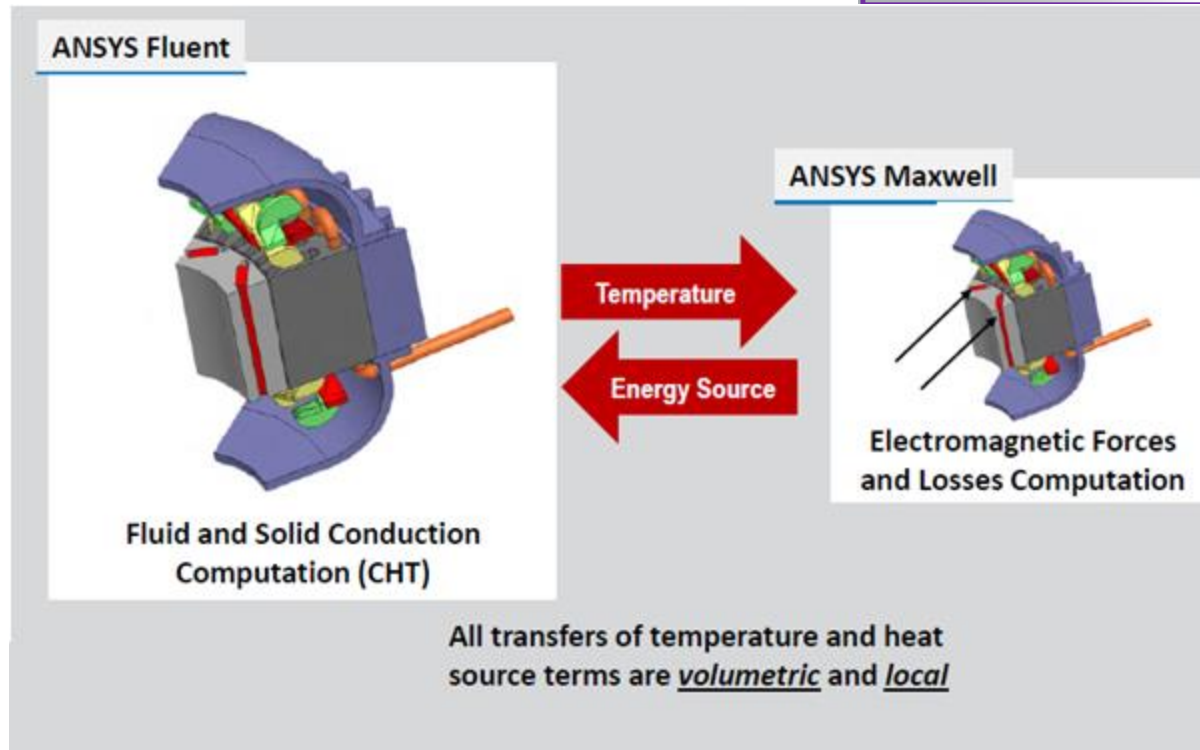
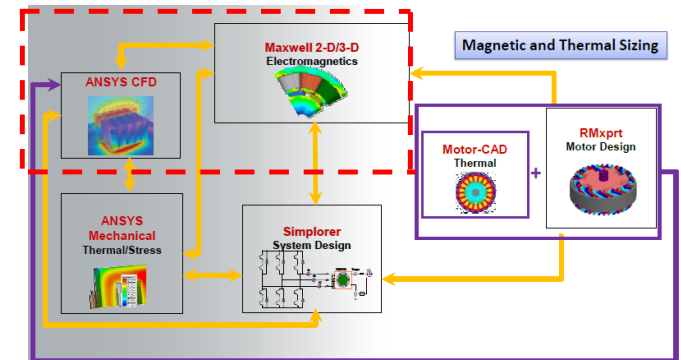
# 电机分析方案

- 电磁<—>流&固—>结构 三方耦合 分析方案:



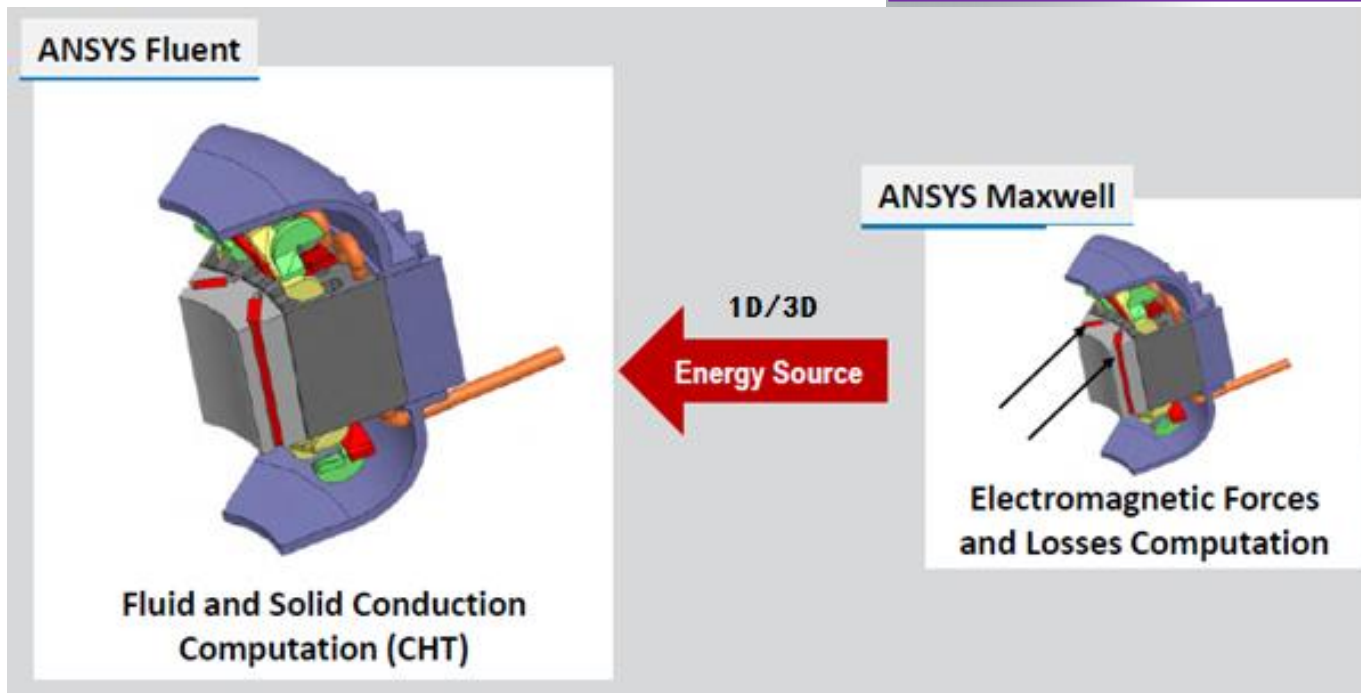
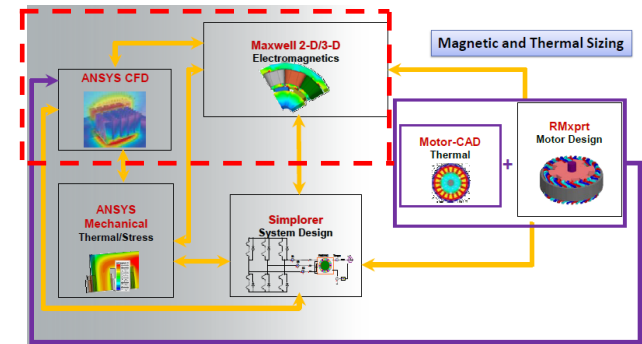
# 电机分析方案

## ■ 电磁<—>流&固双向耦合分析方案:



# 电机分析方案

## ■ 电磁→流&固 单向耦合 分析方案:

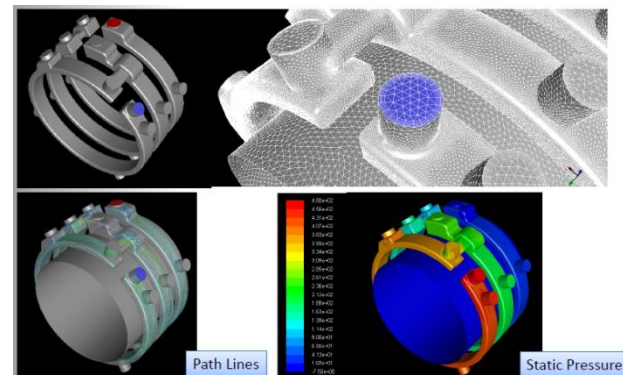
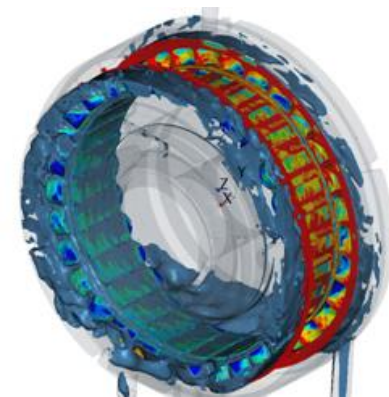
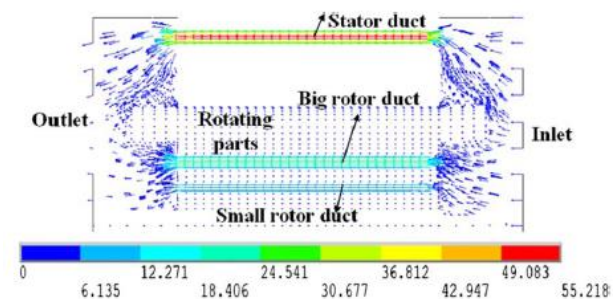




# 电机冷却方式

## ■ 比较常见的电机冷却方式有以下三种

- 空冷：通过转子结构或散热风扇的运动带动空气流动进行散热
  - ✓ 属于直接冷却
  - ✓ 结构简单，噪声大
  - ✓ 冷却效率低，适用于功率密度较小的电机
- 水冷：通过水泵驱动冷却水在水套中流动带走电机发热
  - ✓ 属于间接冷却
  - ✓ 结构复杂、噪声小，绝缘、防腐蚀要求高
  - ✓ 冷却效率高，适用于功率密度大的电机
- 油冷：通过油泵驱动冷却油流经电机内部带走热量
  - ✓ 属于直接冷却
  - ✓ 结构复杂、噪声小、无绝缘腐蚀要求
  - ✓ 冷却效率较高，适用于功率密度大的电机



# 电机散热分析内容

## ■ 电机散热分析通常包含以下三方面内容：

- 1. 在固定载荷下计算电机最高升温度和局部高温区
  - ✓ 稳态计算
  - ✓ 初始状态为冷态
- 2. 在固定载荷下计算电机达到最终温升所需时间
  - ✓ 瞬态计算
  - ✓ 初始状态为冷态
- 3. 在某中典型路况载荷下电机内的温度变化情况
  - ✓ 瞬态计算
  - ✓ 初始状态为冷态或热态

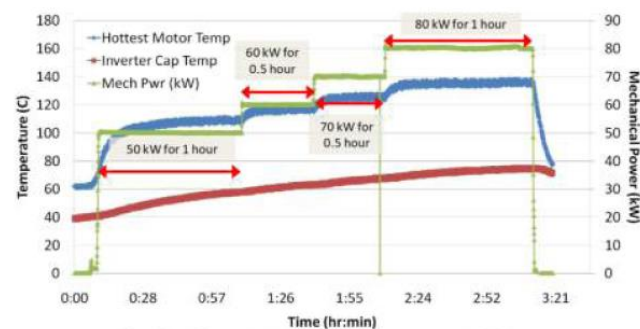
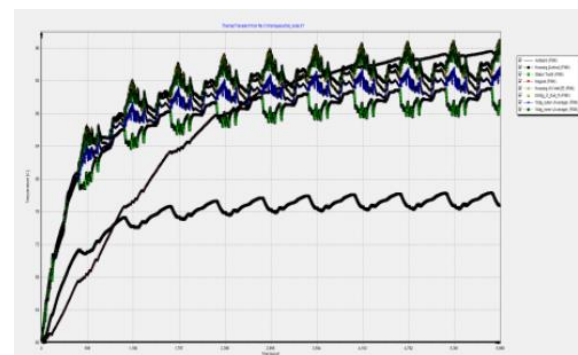
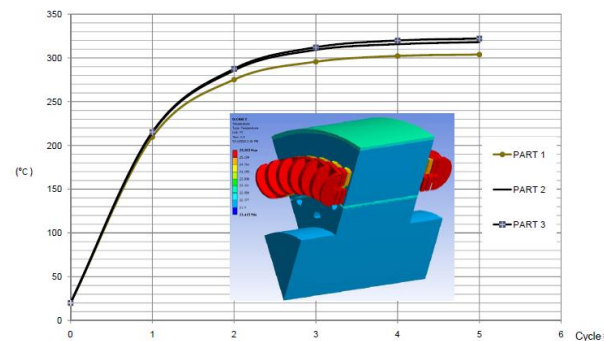


Fig. 15. Nissan LEAF continuous test at 7,000 rpm.

# 电机散热分析流程

## ■ 网格:

- 利用Fluent R17 Meshing的Join/Intersect连通接触固体部件
- 基于拓扑分域，流体和固体同时建模

## ■ 边界条件

- 电机&风扇转速
- 热源大小
- 冷却通道入口压力或流量

## ■ 物理模型

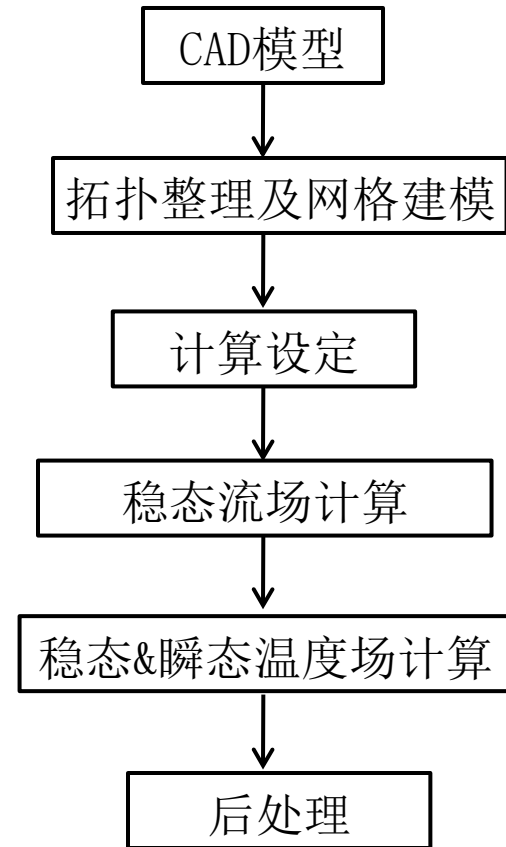
- 湍流模型
- MRF或Sliding Mesh
- 能量方程&能量源项

## ■ 计算方案

- Step1: 先关闭能量方程，仅计算流场至稳定
- Step2: 关闭流动方程，开启能量方程至稳定

## ■ 后处理

- 各部件平均温度、最高温度及温度分布
- 冷却介质流量或压降
- 流域速度场、压力场、温度场分布等



# 2D/3D电磁—热流耦合分析案例

## ■ 分析目标：

- 展示多物理场耦合分析对精确预测电机动力性能的必要性
- 展示电机扇区模型的3D电磁建模对模拟精度的影响

## ■ 分析模型：

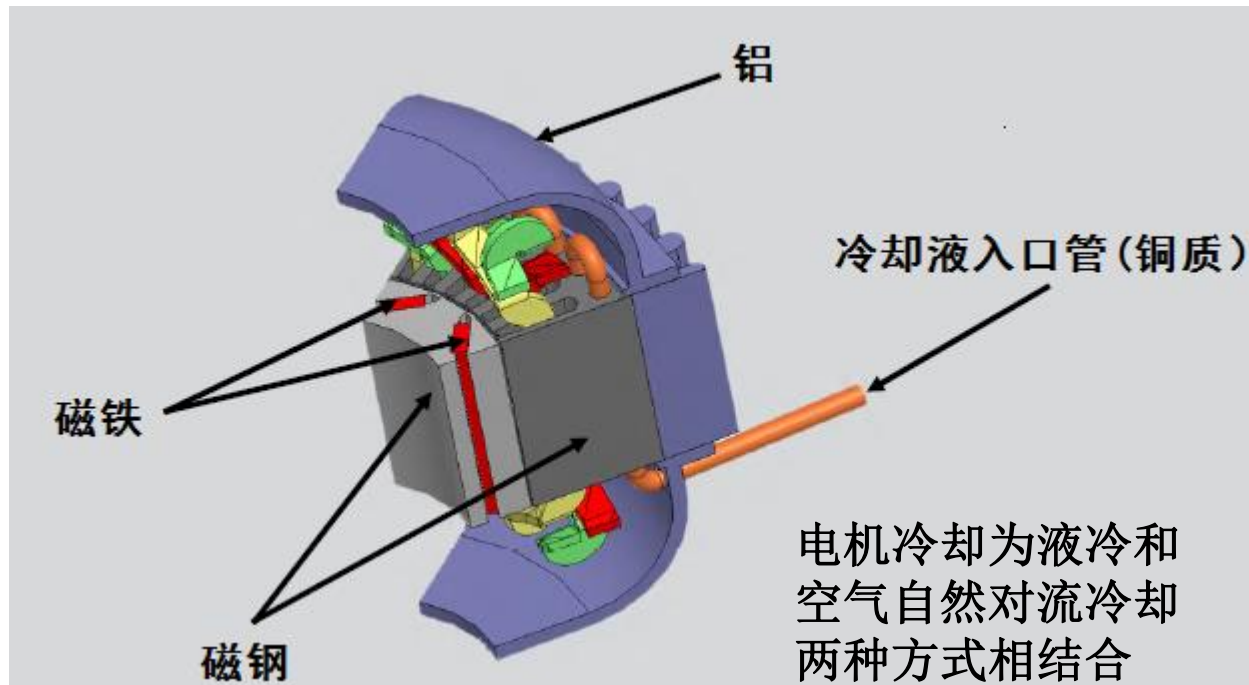
- 某内置式同步永磁电机

## ■ 分析工具：

- 电磁： ANSYS Maxwell
- 热流： ANSYS Fluent

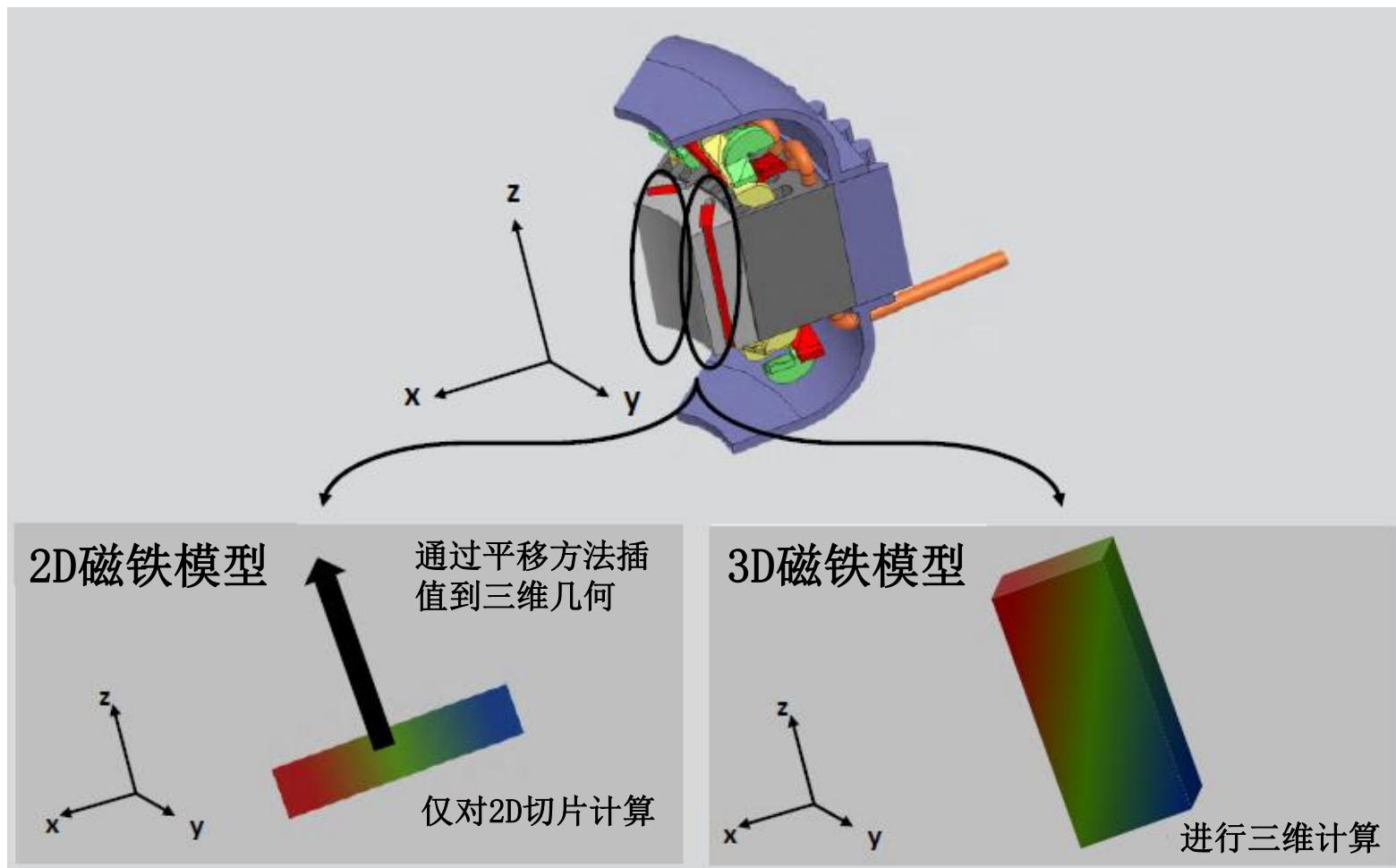
# 2D/3D电磁—热流耦合分析案例

## ■ 几何模型



# 2D/3D电磁—热流耦合分析案例

## ■ 电磁模型





# 2D/3D电磁—热流耦合分析案例

## ■ 材料温度会影响以下两个关键特性

- 磁铁的磁化特性
- 铜质和铝质材料的热导率

### 示例说明

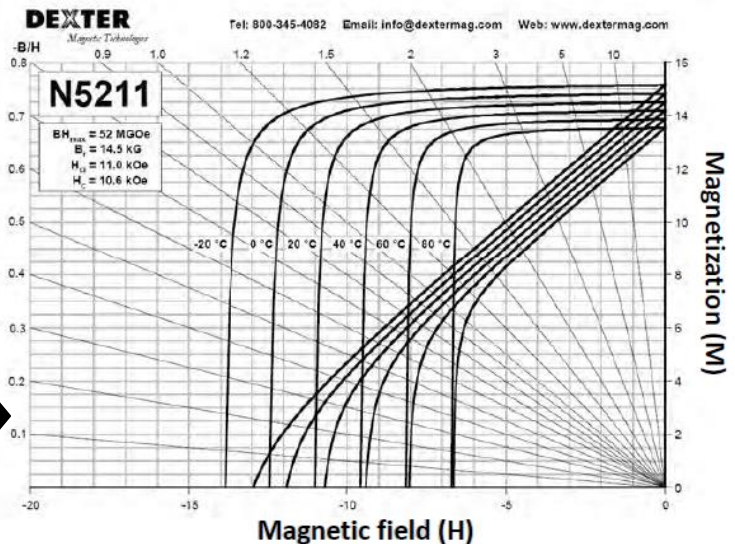
#### Nd-Fe-B

**DEXTER**  
Magnetic Technologies

Grade	Maximum Energy Product $BH_{max}$	Residual Induction $B_r$	Minimum Intrinsic Coercivity $H_{ci}$	Coercivity $H_c$	Maximum Operating Temp $T_{mo}$	Curie Temp $T_c$	Coefficient Induction [20-150 °C] $\alpha$	Coefficient Coercivity [20-150 °C] $\beta$
	MGOe	kG	kOe	kOe	°C	°C	% / °C	% / °C
N5211	52	14.5	11	10.6	50	310	-0.12	-0.85

- 磁铁制造商会提供induction和coercivity coefficients (感应系数和矫顽系数)，这两个参数对磁场特性影响巨大

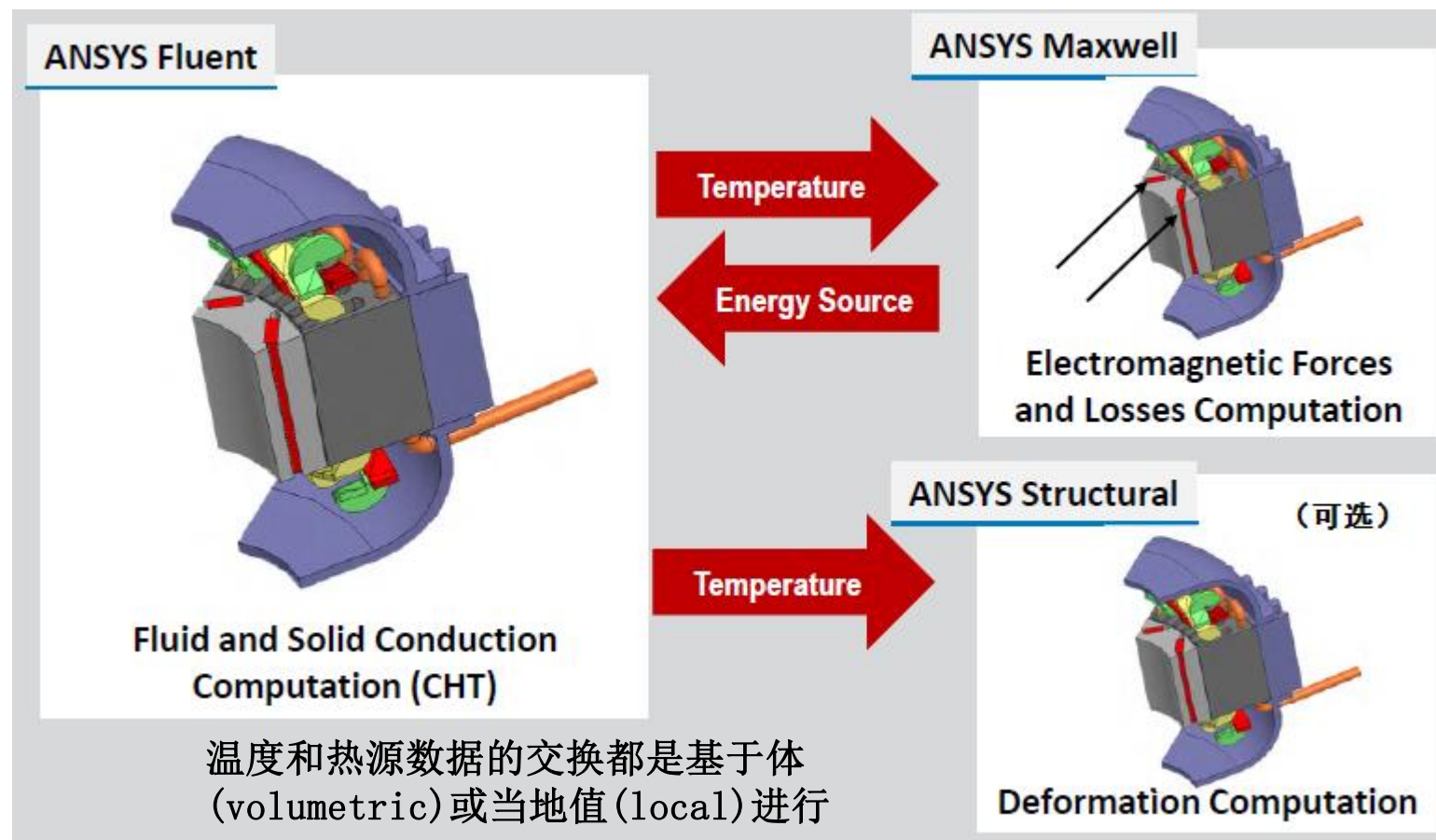
$$\begin{cases} B_r(T) = B_r(T_0) \cdot [1 + \alpha(T - T_0)] = B_r \cdot p(T) \\ H_{ci}(T) = H_{ci}(T_0) \cdot [1 + \beta(T - T_0)] = H_{ci} \cdot q(T) \end{cases}$$



不同温度下的退磁曲线

# 2D/3D电磁—热流耦合分析案例

## ■ 耦合计算方法

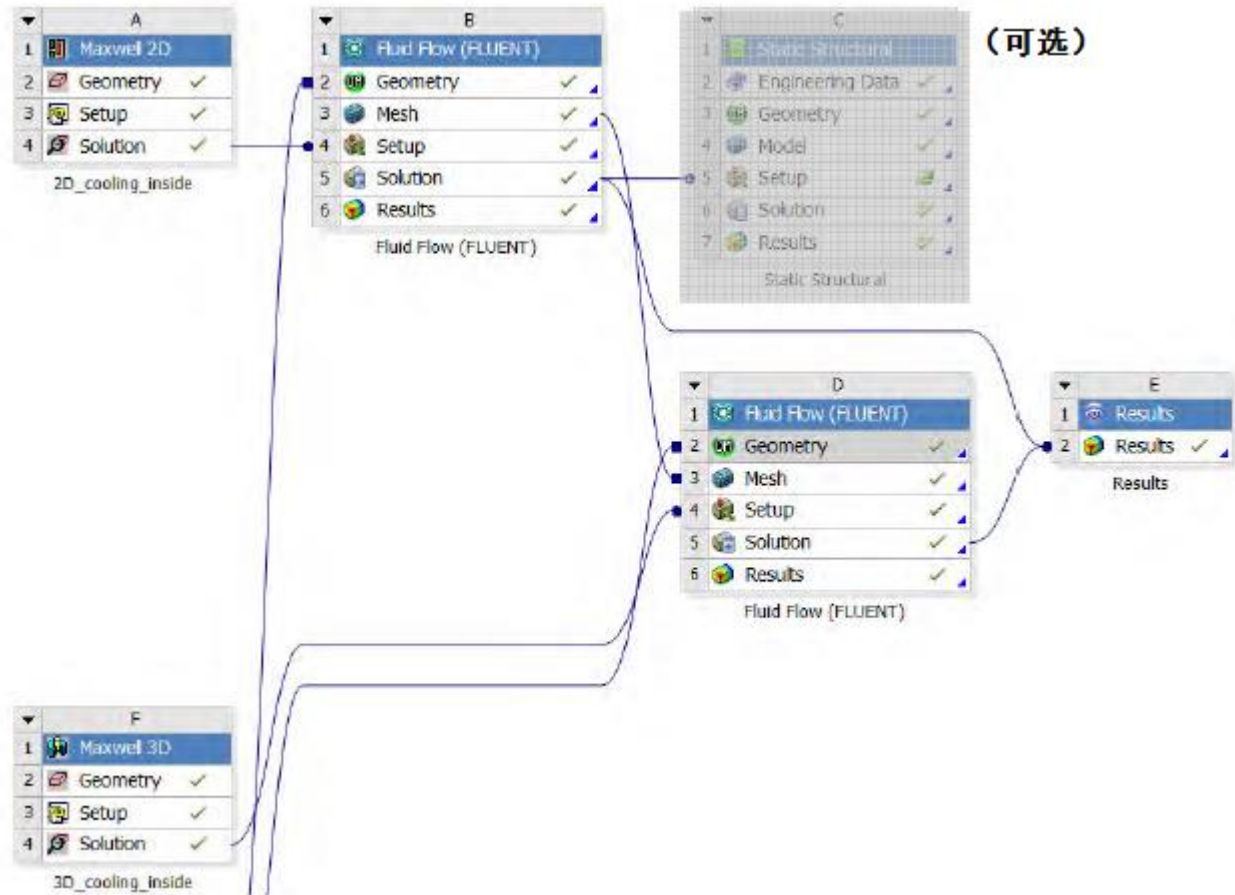




# 2D/3D电磁—热流耦合分析案例

## ■ ANSYS WorkBench下模型连接

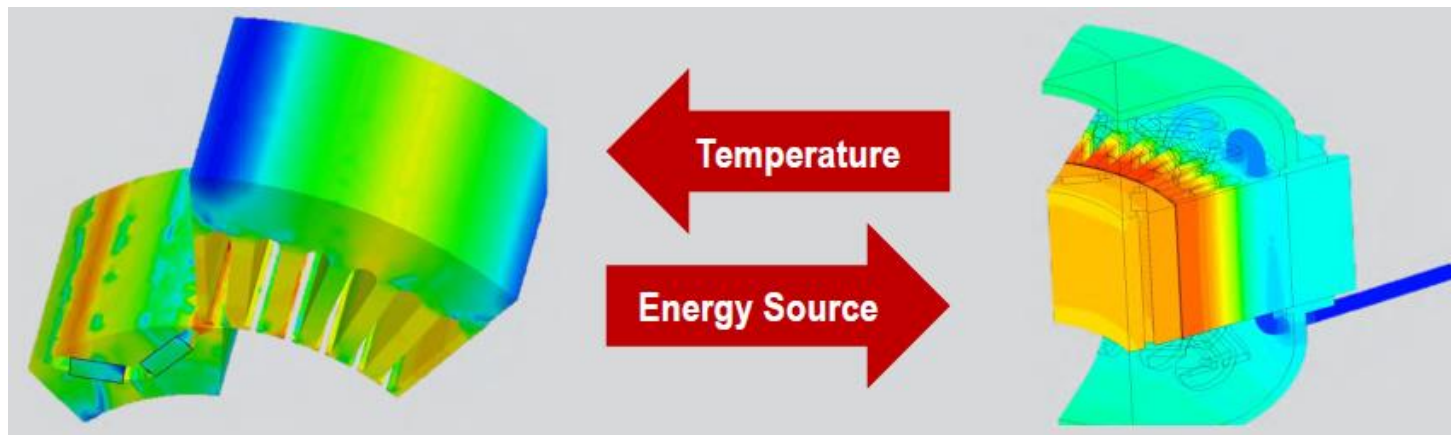
2D电磁模型



3D电磁模型

# 2D/3D电磁—热流耦合分析案例

## ■ 电磁—热流体智能耦合方法



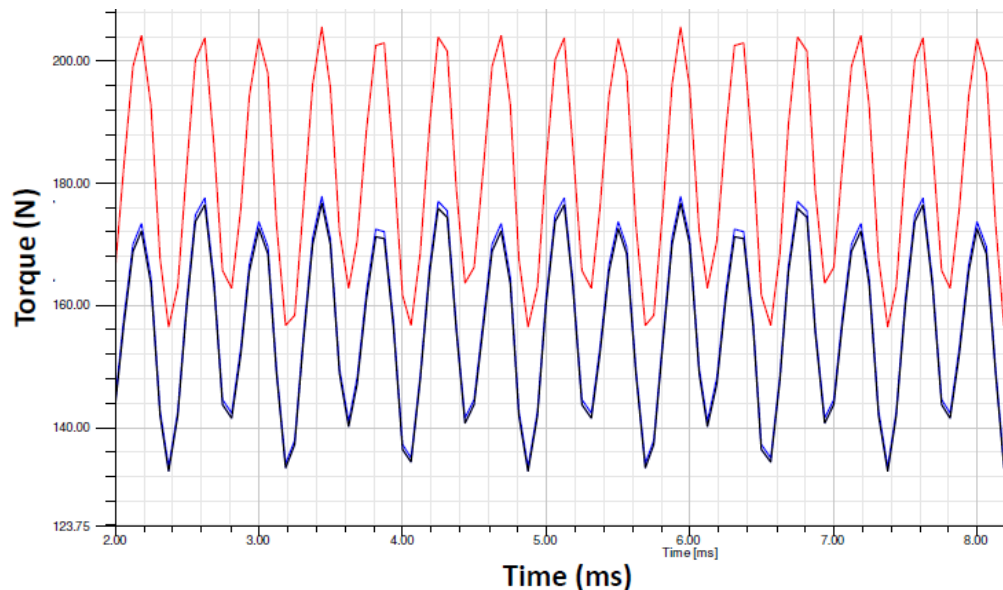
Maxwell时间平均电磁损失

Fluent稳态温度场

- 电磁模型和流固模型时间步长差别巨大
  - 电磁场计算采用5ms的时间步长 (200 Hz)
  - 金属导热计算的时间步长为数分钟
- 如果采用电磁场的时间不长进行直接耦合计算量将会非常大;因此采用如下耦合技巧:
  1. 首先将电磁场计算到收敛
  2. 将时间平均的体热源传给流固模型进程传热计算
  3. 将流固模型计算到收敛
  4. 将三维温度传给电磁模型更新其温度分布。

# 2D/3D电磁—热流耦合分析案例

## ■ 多物理场耦合的必要性

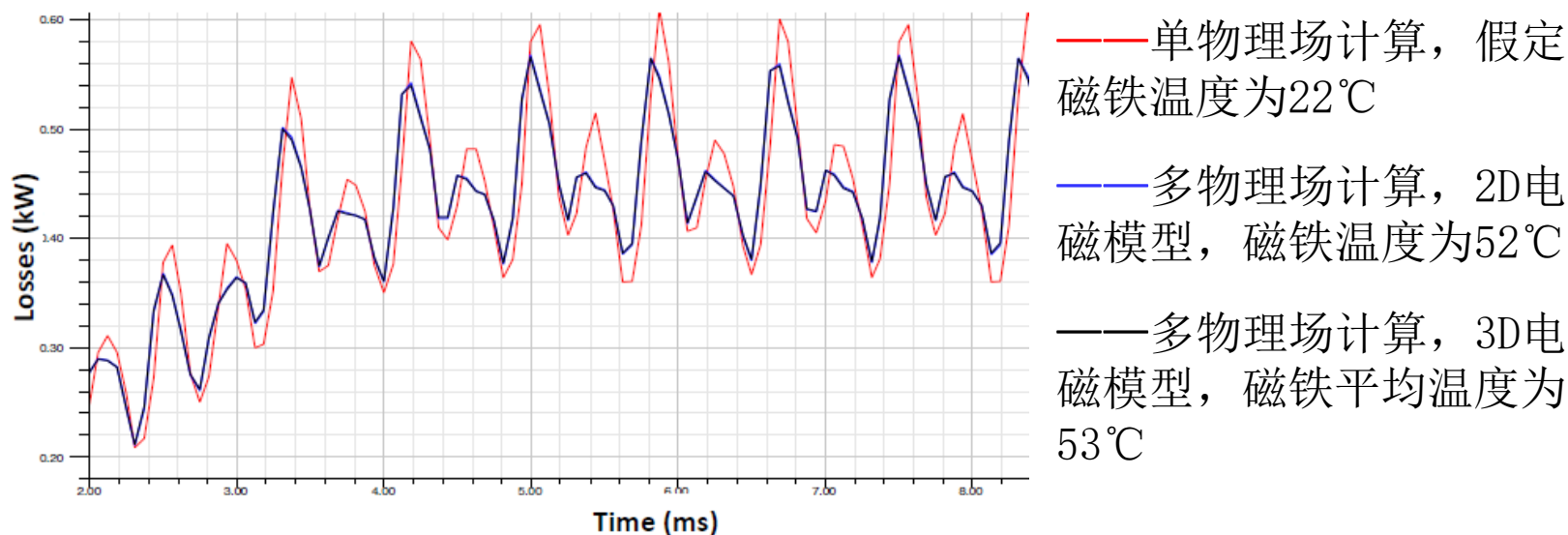


- 2D电磁模型的多物理场耦合即可满足扭矩的可靠预测
- 上述结果表明，如果考虑多物理场特性，预测的性能比简单地假定系统温度为22℃时低16%。

**多物理场耦合对可靠预测系统性能至关重要！**

# 2D/3D电磁—热流耦合分析案例

## ■ 温度对电磁损失的影响



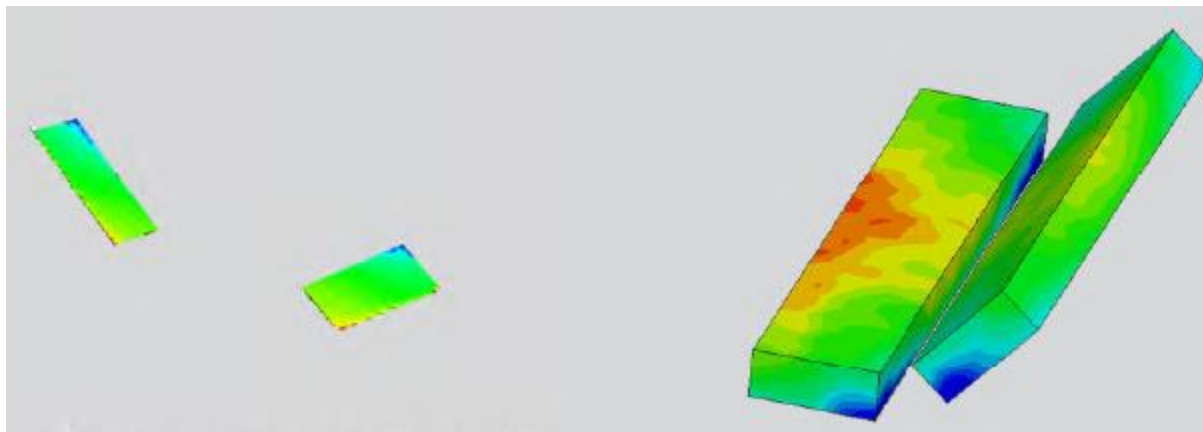
■ 定子和转子中的电磁损失（也即流固分析中的热源）也基于温度场进行了修正，具体是通过对电磁场的修正来实现

。

## 2D/3D电磁—热流耦合分析案例

### ■ 磁铁中的温度不均匀性：

- 磁铁中的温度存在着明显的空间不均匀性；
- 三维模型能更加真实的反应实际的温度场



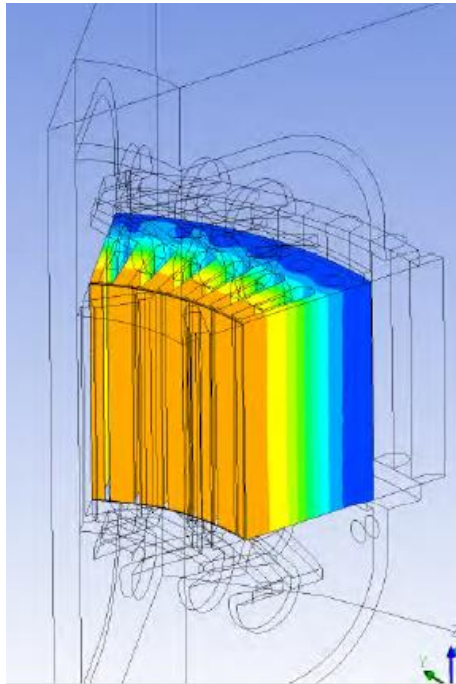
Maxwell中  
的2D温度场

Maxwell中  
的3D温度场

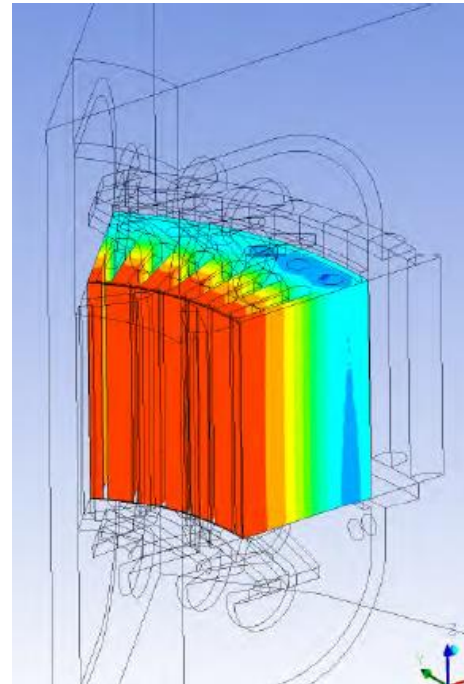
**温度场的不均匀性是否会影响电机性能的预测？**

# 2D/3D电磁—热流耦合分析案例

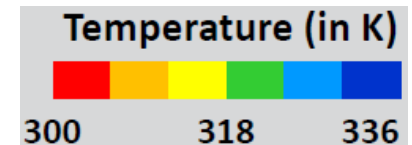
## ■ 3D-3D耦合的必要性：



2D-3D耦合



3D-3D耦合

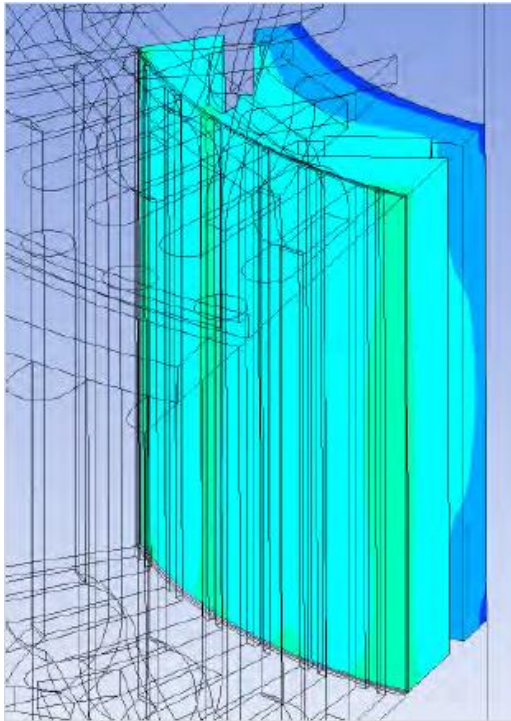


- 两种耦合方式在定子上存在7度的温差，对电机而言这个差别是不容忽视的。

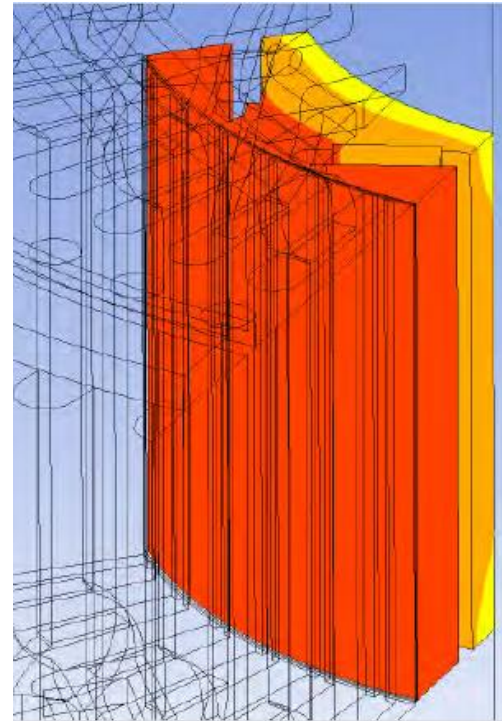


# 2D/3D电磁—热流耦合分析案例

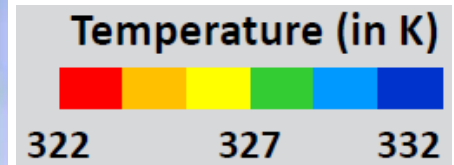
## ■ 3D-3D耦合的必要性：



2D-3D耦合



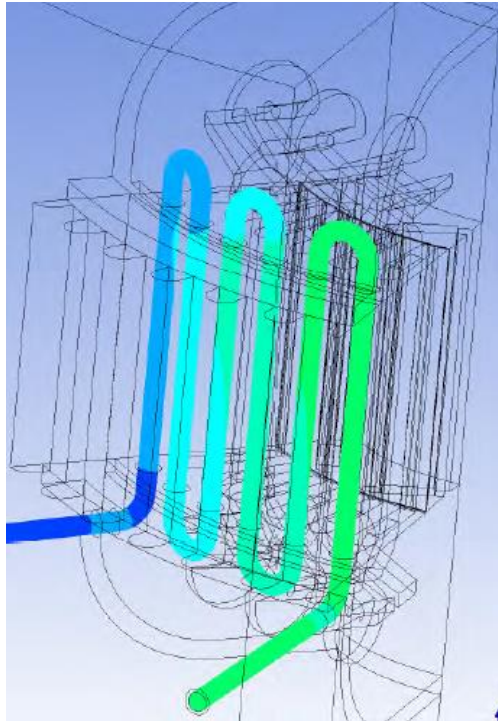
3D-3D耦合



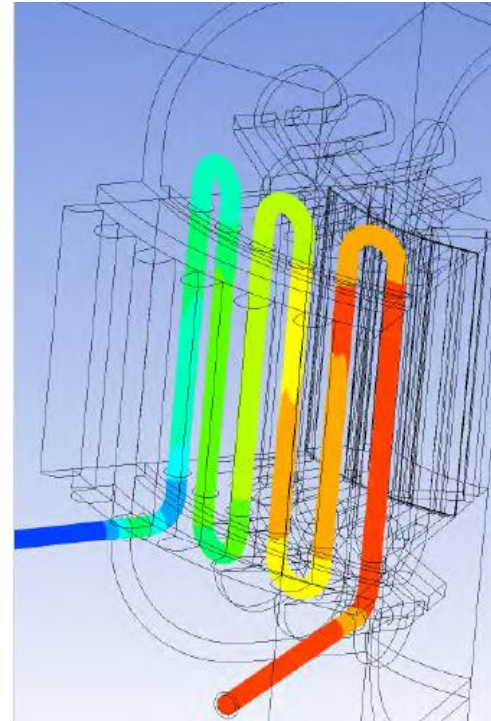
- 两种耦合方式在**转子**上存在**6度**的温差，这个差别也是不容忽视的。

# 2D/3D电磁—热流耦合分析案例

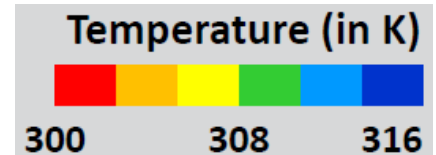
## ■ 3D-3D耦合的必要性：



2D-3D耦合



3D-3D耦合



## ■ 3D-3D预测的出水温度明显高于2D-3D耦合。



## 2D/3D电磁—热流耦合分析案例

- 从前述2D-3D耦合与3D-3D耦合的结果比较可知
  - 3D-3D耦合预测的电磁损失更大;
  - 冷却系统（液体）整体温度更高
- 而2D-3D耦合无法捕捉这一现象，2D电磁计算中的均值插值抹除了空间的不均匀性，而这种不均匀性是不可忽略的
- 因此，电机散热分析中3D-3D耦合是非常必要的。

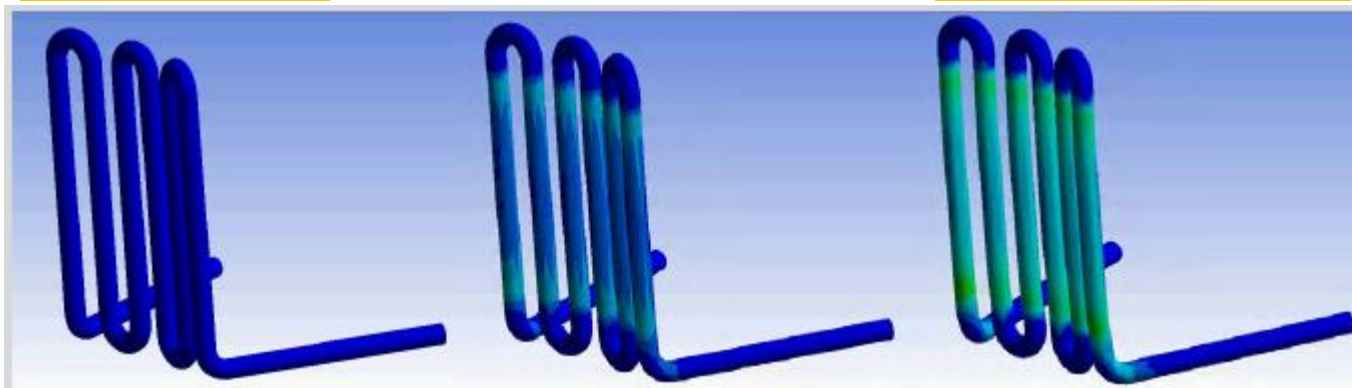
## 2D/3D电磁—热流耦合分析案例

### ■ 结构耦合分析（可选）：

- 基于温度场可以方便得到热变形或热应力结果

电机启动时

电机稳定运行时



温度升高

- 变形或应力可以通过ANSYS Mechanical进行单向温度—结构耦合计算得到。

A 3D CAD model of a turbine wheel assembly. The central shaft is green, surrounded by a green ring. The main body of the wheel is yellow, with a red section at the top. The outer rim is blue. The model is shown from a top-down perspective.

- ◆可获得三维详细信息
- ◆可直接模拟真实几何

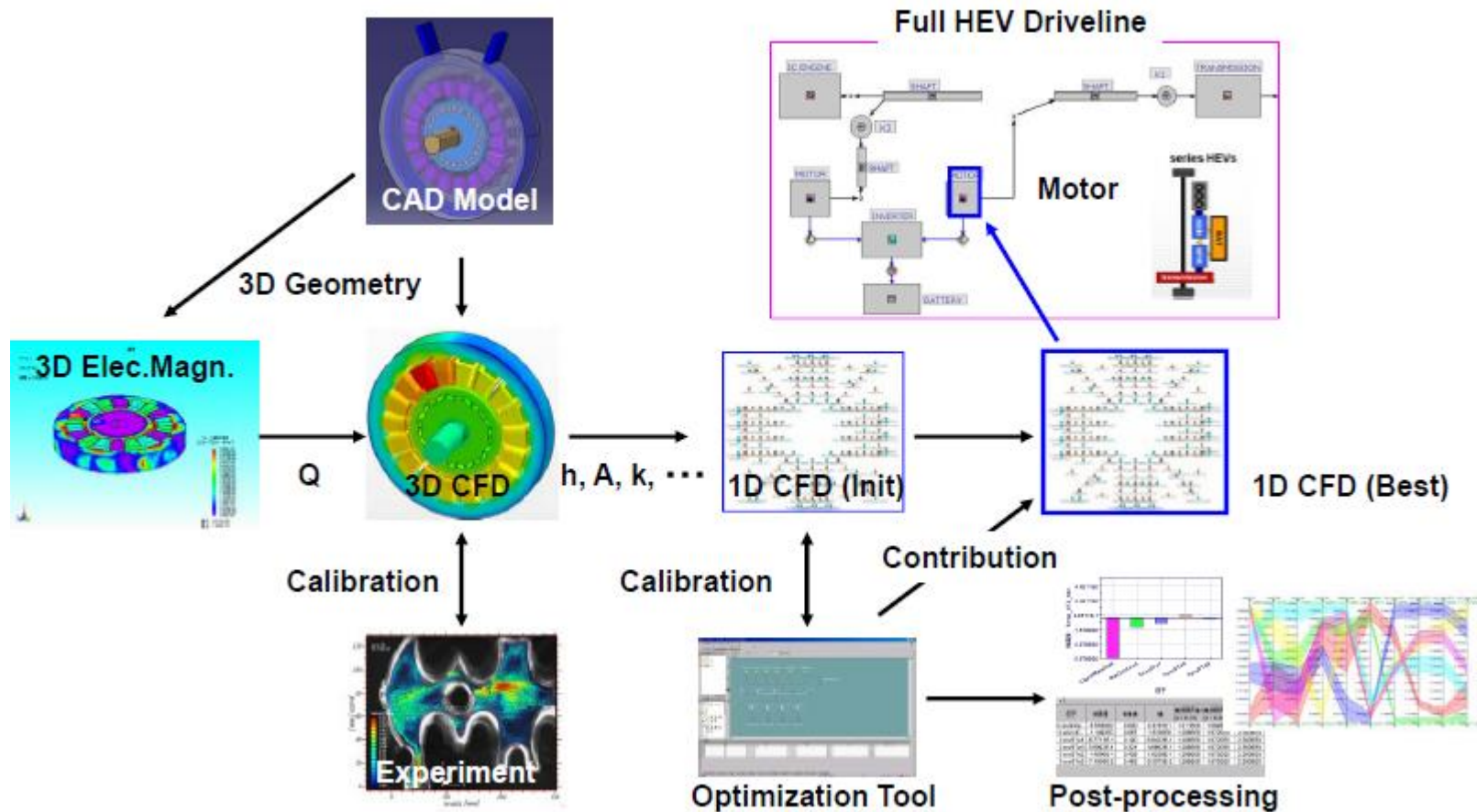
### ◆计算量大, 不易进行瞬态分析

- ◆计算量小
- ◆可进行长时间的瞬态计算

◆精度较低, 无法预测温度空间分布

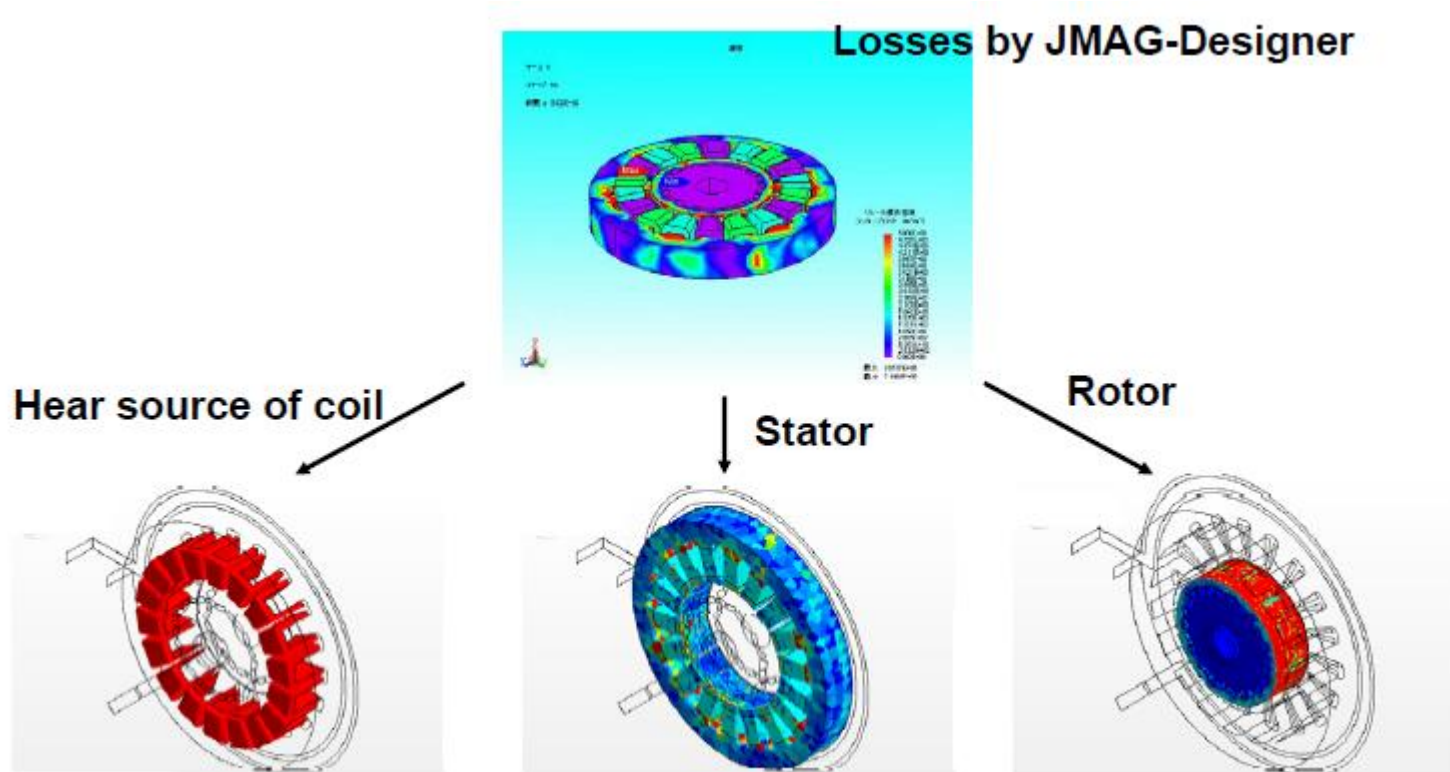
# 1D/3D电机CFD散热分析案例

## ■ 分析方案:



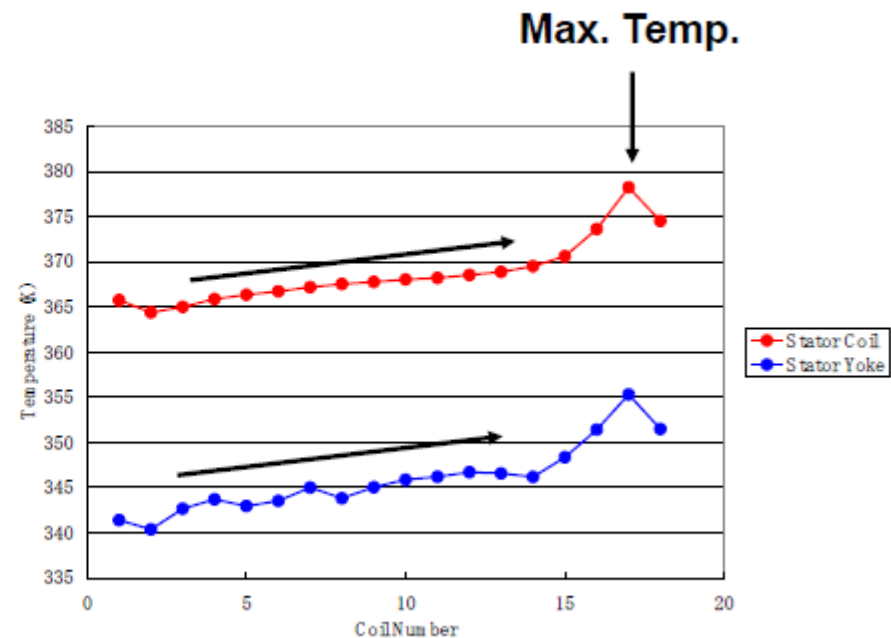
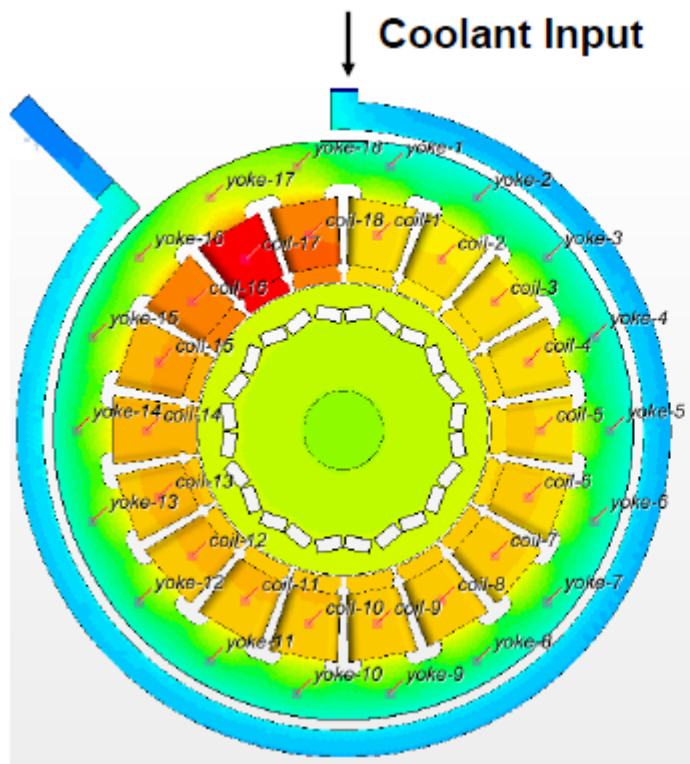
# 1D/3D电机CFD散热分析案例

## ■ 3D CFD模型（热源通过JMAG计算）：



# 1D/3D电机CFD散热分析案例

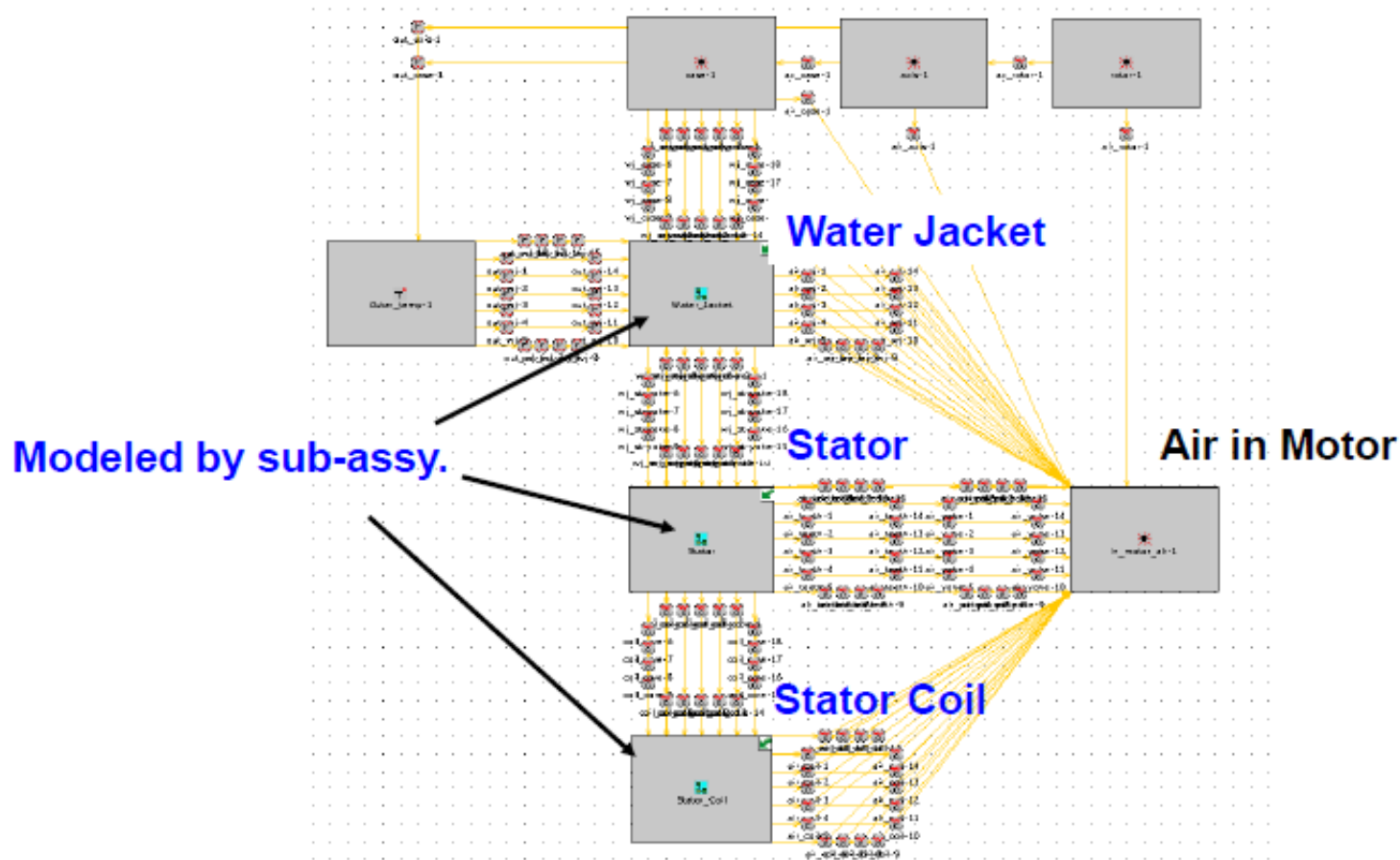
## ■ 3D CFD结果（用于1D CFD模型标定）：





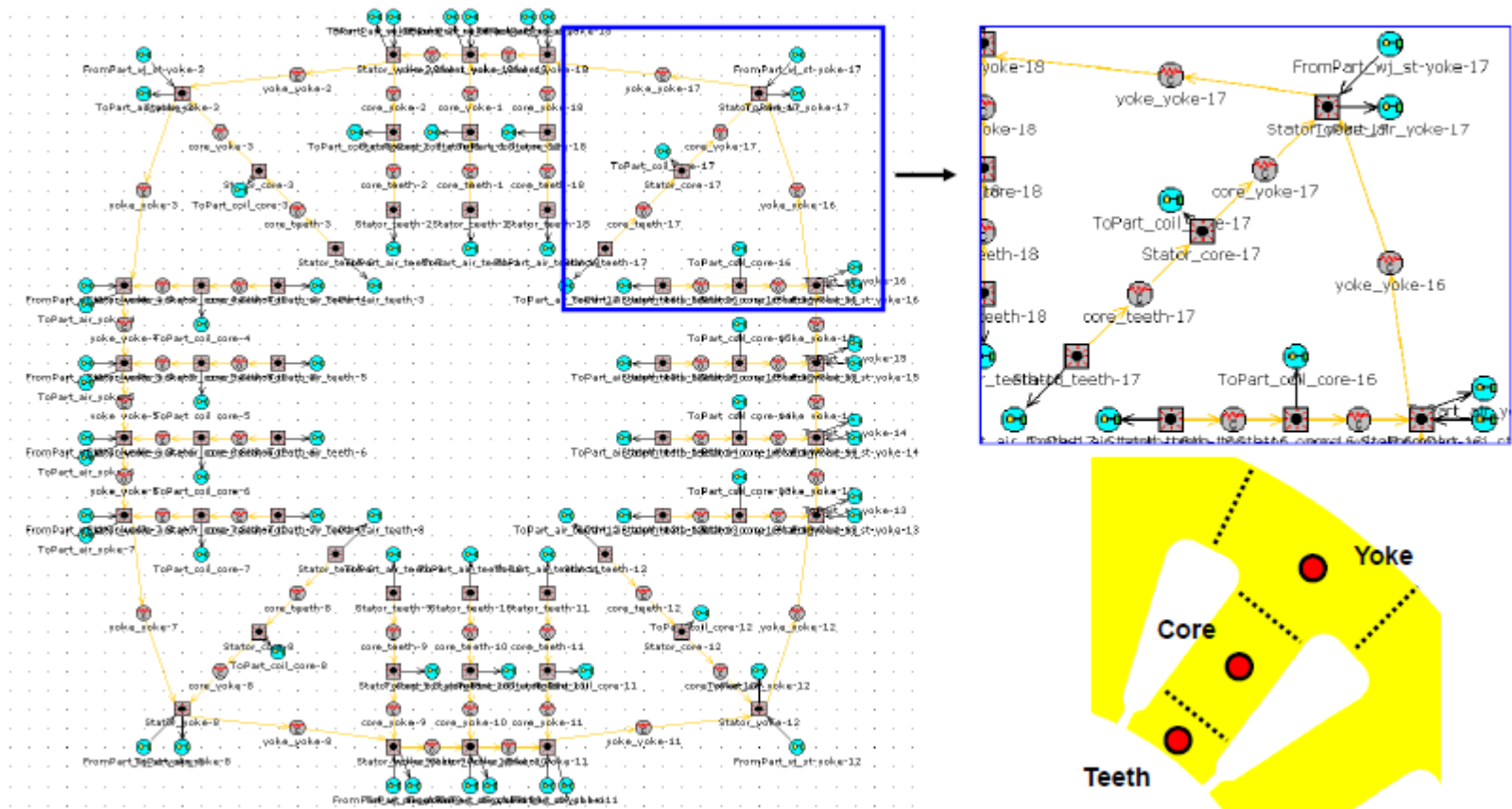
# 1D/3D电机CFD散热分析案例

- 1D CFD模型——主模型：采用GT-Power构建



# 1D/3D电机CFD散热分析案例

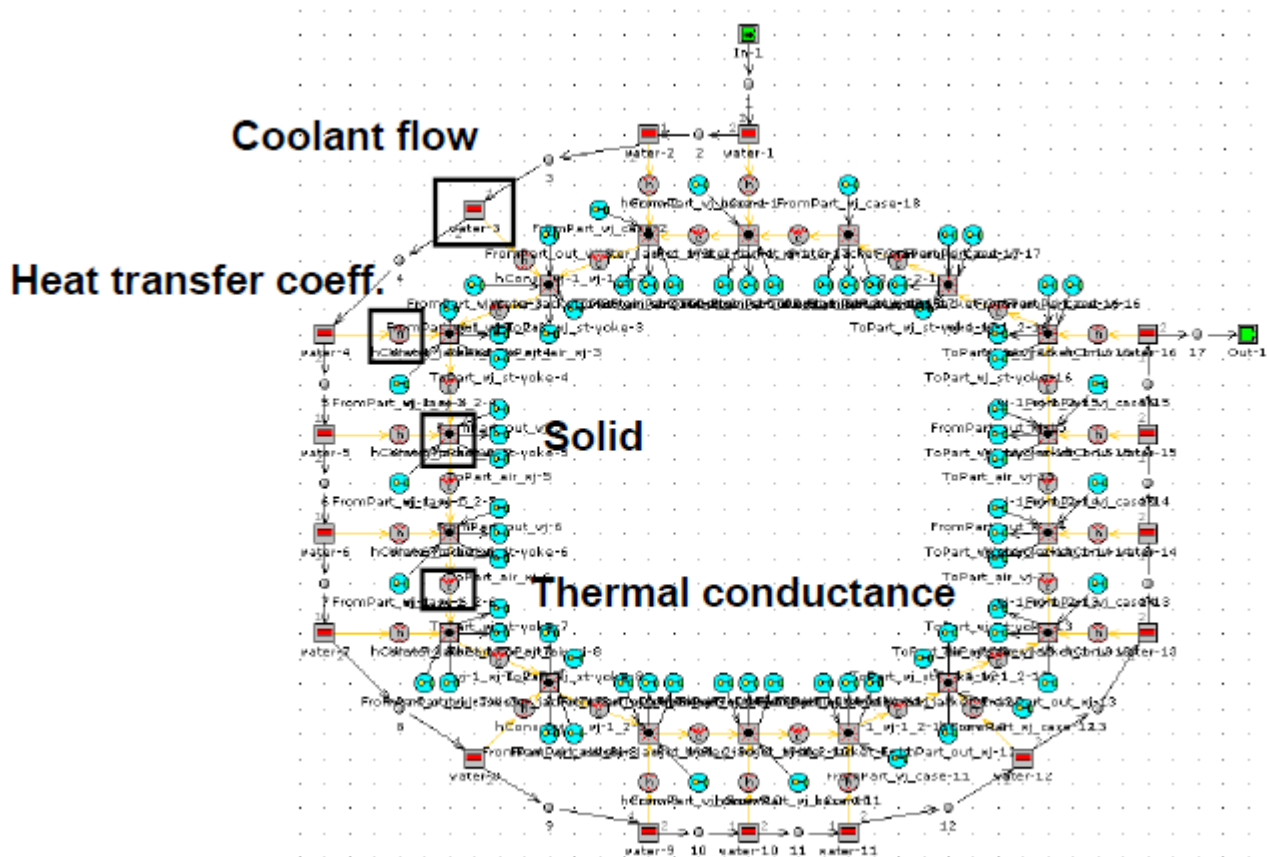
## 1D CFD模型——定子模型





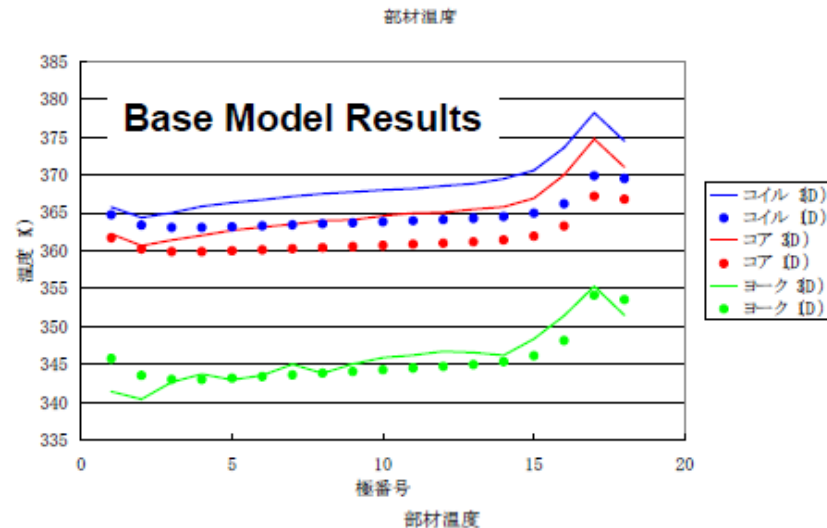
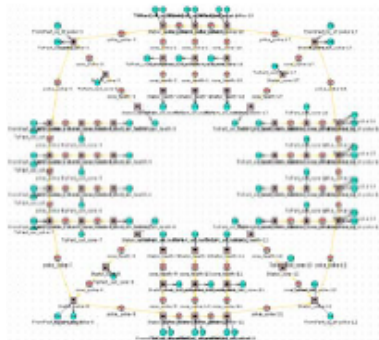
# 1D/3D电机CFD散热分析案例

## ■ 1D CFD模型——水套模型

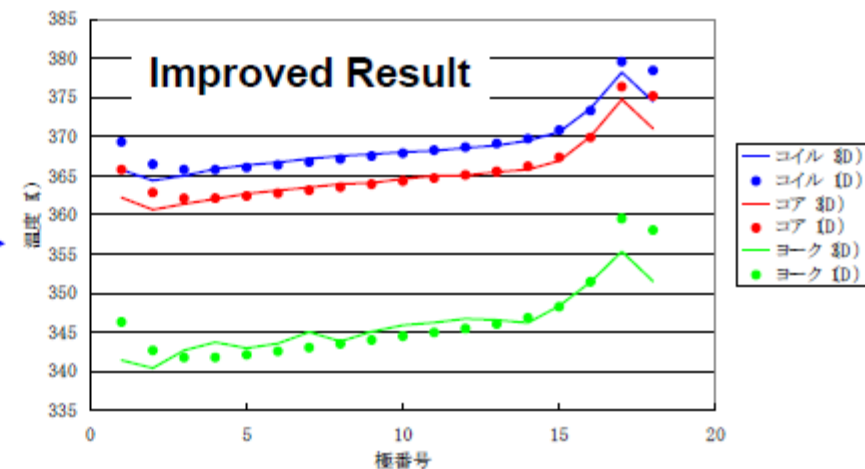
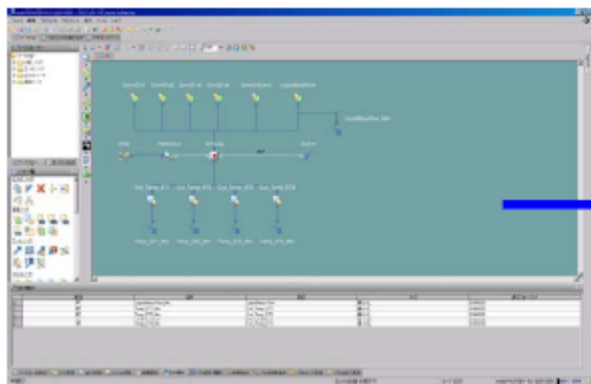


# 1D/3D电机CFD散热分析案例

## ■ 1D CFD模型标定：采用优化软件modeFRONTIER



标定前

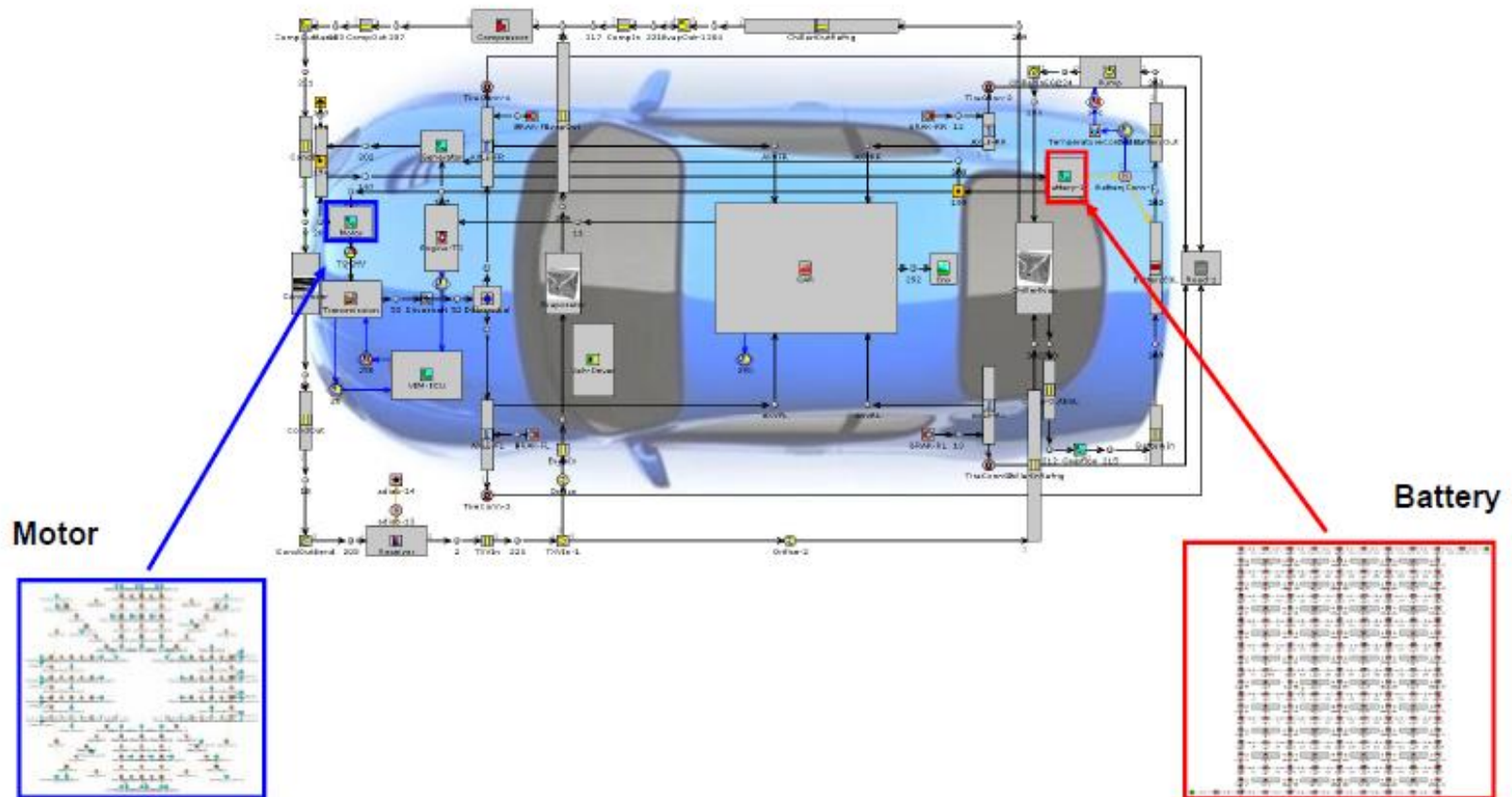


标定后

Parameter Calibration

# 1D/3D电机CFD散热分析案例

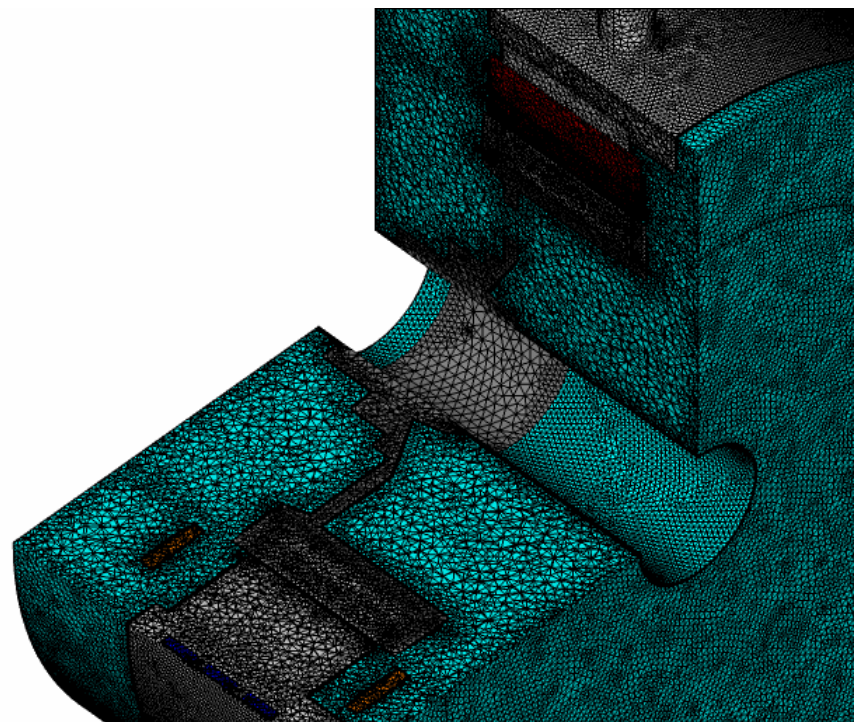
## ■ 1D CFD模型应用：可用于整车系统分析



# 水冷电机散热分析案例

## ■ 网格模型:

- 网格总数 : 8,027,307
- 空气部分: 3,413,142
- 冷却液部分: 443,098
- 固体部分: 4,171,067



# 水冷电机散热分析案例

## ■ 计算设定

稳态计算				
湍流模型				
	k-ε 模型			
多重参考系				
	转速	[rpm]	2200	
发热条件				
	发热率	[W]	线圈	843.49
			定子铁芯	212.78
			转子铁芯	33.09
			磁铁	85.84

# 水冷电机散热分析案例

## ■ 边界条件设定

冷却液入口	速度入口	入口流速 [l/min]	10.0
		温度 [°C]	70.0
冷却液出口	压力出口	压力 [Pa]	0.0 (环境压力)
		温度 [°C]	90.0
水套表面	壁面	温度 [°C]	90.0
环境空间表面	光滑壁面	温度 [°C]	90.0
轴表面	壁面	壁面转速 [rpm]	2200.0
		温度 [°C]	90.0



# 水冷电机散热分析案例

## ■ 材料属性（流体）

材料属性	空气		冷却液（水）	
密度	理想气体（与压力无关）		常数	
	分子量 [kg/kmol]	28.966	密度 [kg/m <sup>3</sup> ]	996.95
粘性系数 [Pa·sec]	1.7894e-5		9.0275e-4	
比热 [J/kg-K]	1006.43		4182	
热传导率 [W/m-K]	0.0242		0.6	

# 水冷电机散热分析案例

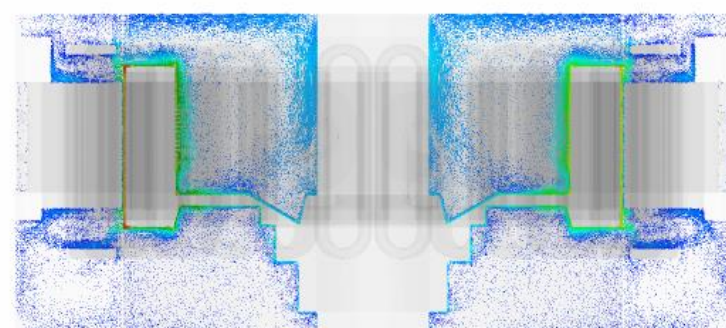
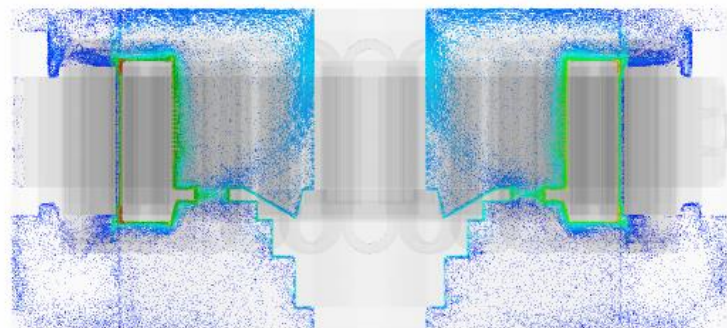
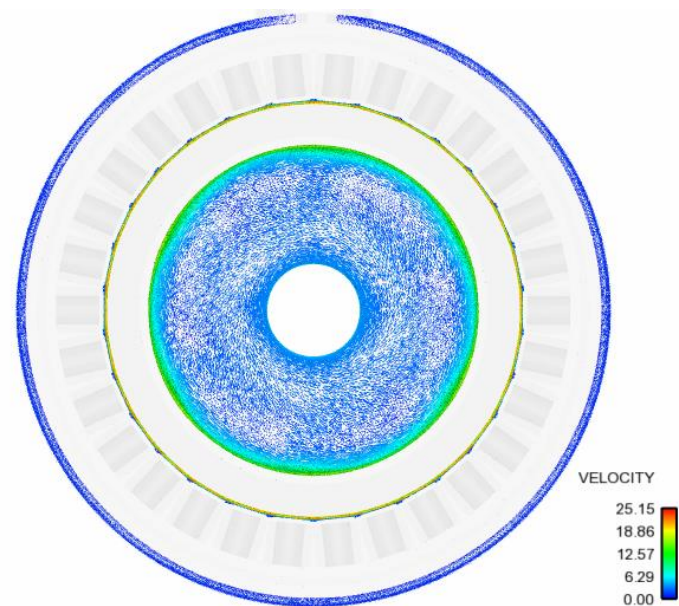
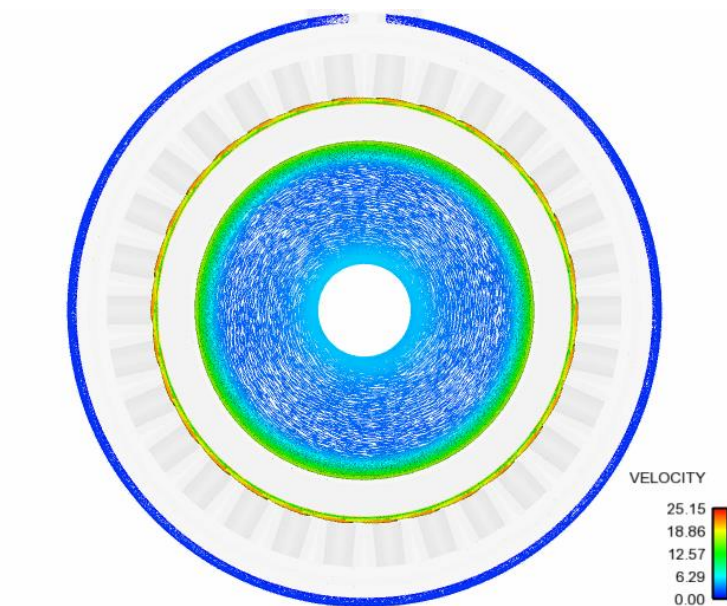
## ■ 材料属性（固体）

组件	材料	密度 [kg/m <sup>3</sup> ]	比热 [J/kg/K]	热传导率 [W/m/K]
水套	YZAlSi9Cu	2700	900	160
线圈	铜	8900	390	398
绝缘纸	绝缘材料	730	1000	0.184
转子板支架	钢	7800	470	57
去重板	合金材料	7930	500	16.3
永磁铁	磁铁	7600	440	8
定子/转子 铁芯	铁	7650	450	26



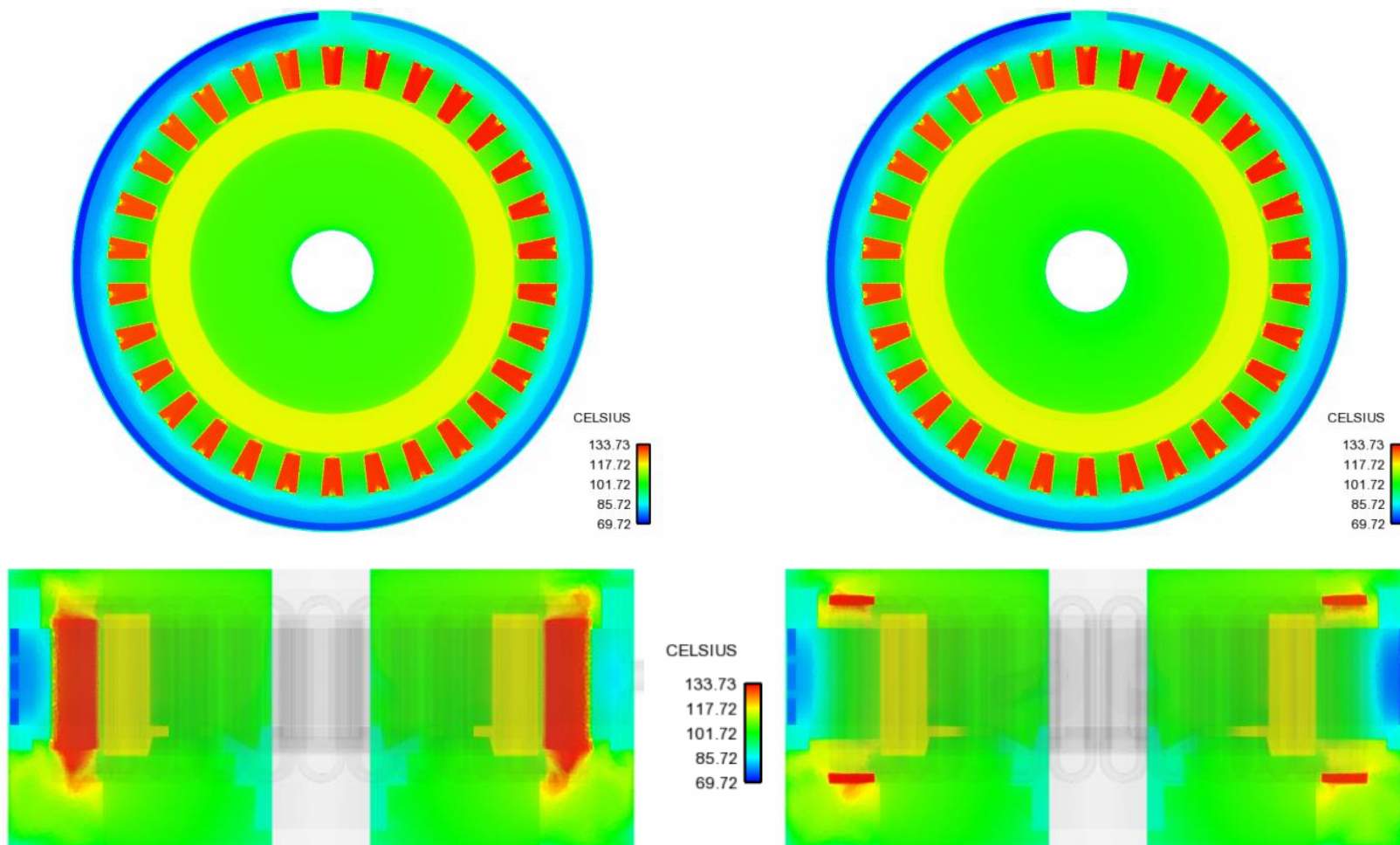
# 水冷电机散热分析案例

## 速度矢量图



# 水冷电机散热分析案例

## ■ 温度分布云图



# 油冷电机散热分析案例

- 某乘用车用油冷电机散热分析：冷却油从入口注入后从15个油孔流入电机内部，主要用于冷却30个绕组。
- 分析目标：优化油孔数量和分布，使油在绕组上分布尽量均匀。

# 油冷电机散热分析案例

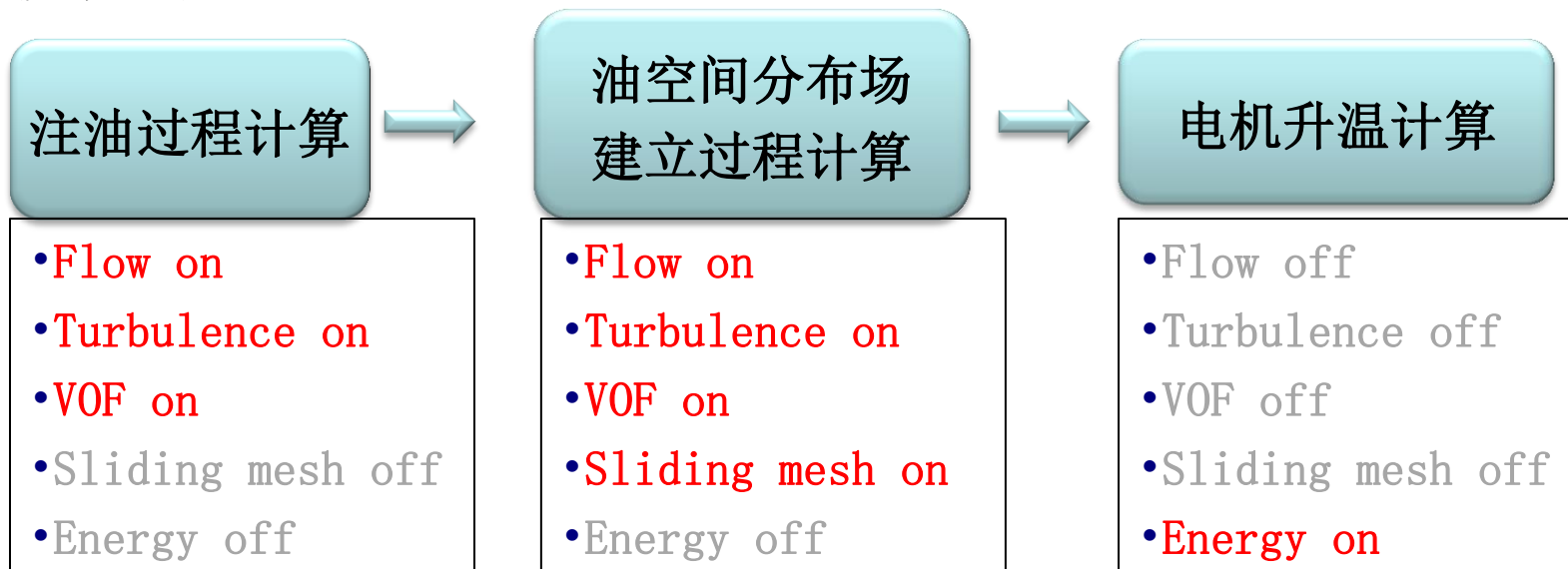
## ■ 技术难点:

- 1. 电机内部同时存在油和气的流动，属于VOF多相流计算
- 2. 多相流流动（油的空间分布）与传热效果直接关联，需要耦合计算
- 2. 电机高速旋转，流动特征时间 $\ll$ 导热特征时间，耦合计算计算量极大

## ■ 模拟思路:

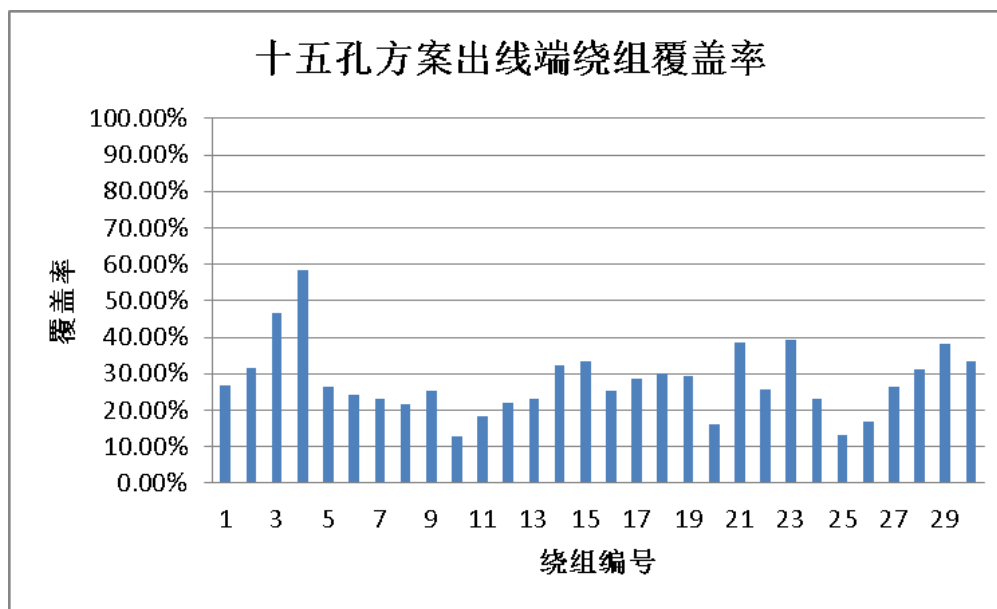
- 将冷却油的VOF场与温度场解耦分析，第一阶段先冻结能量方程，仅计算VOF多相流，直至VOF场基本稳定；第二阶段冻结VOF场，仅开启能量方程计算升温过程。

## ■ 模拟过程:



# 油冷电机散热分析案例

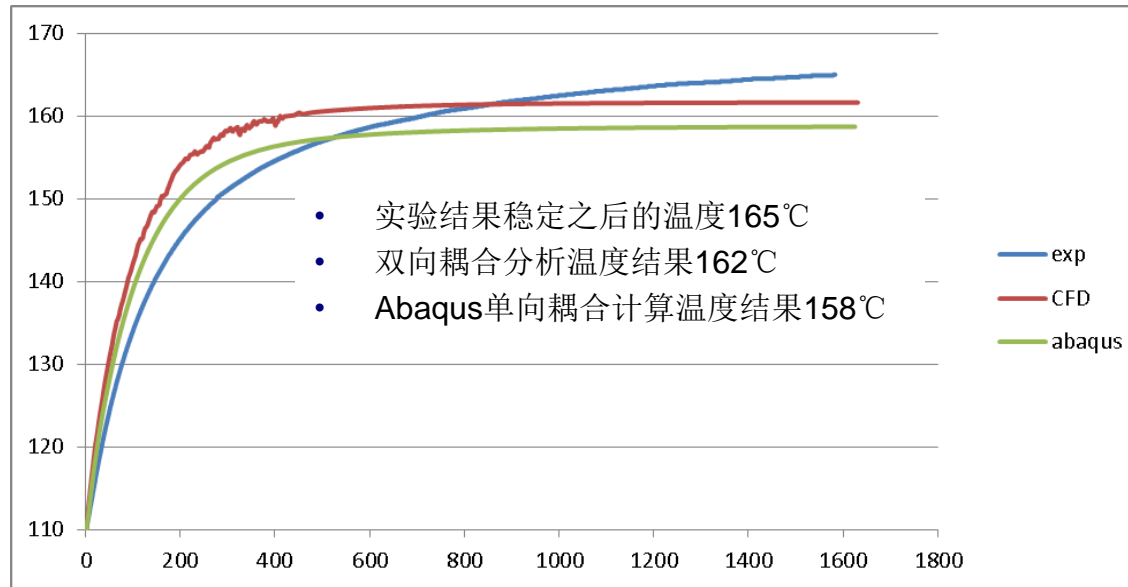
- 流场稳定后冷却油空间分布状态：





# 油冷电机散热分析案例

## ■ 升温计算结果:

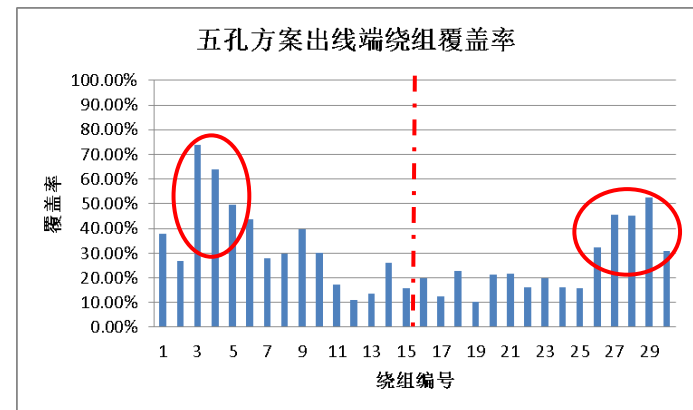
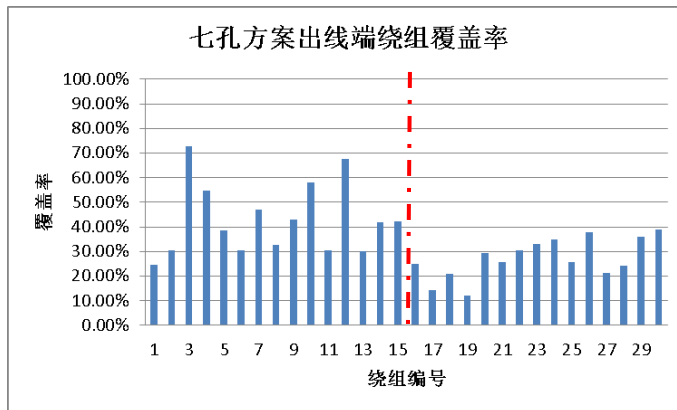
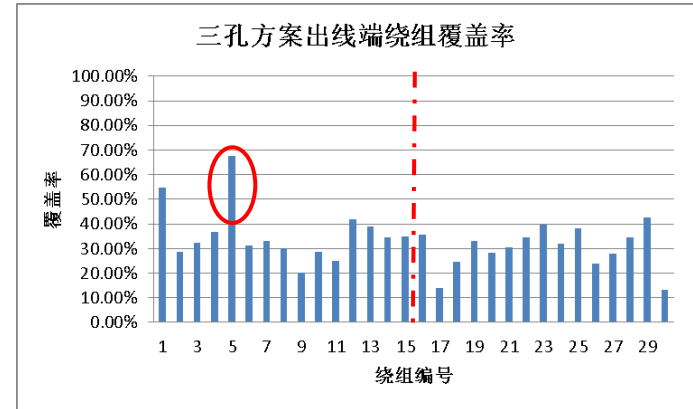
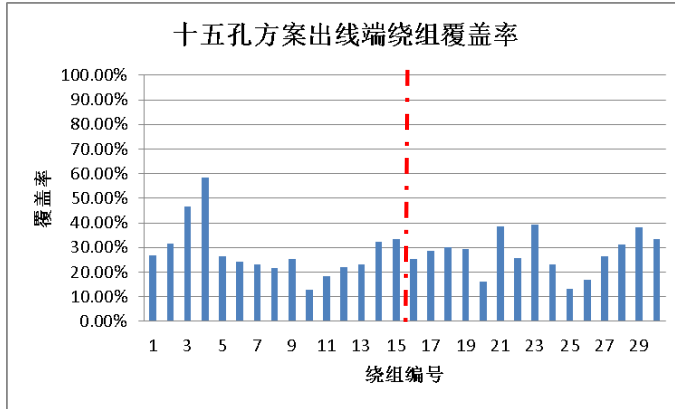


- 升温阶段CFD曲线高于实验曲线，可能是实验过程热源是逐渐增大，而CFD计算中加载的是最终稳定状态的热源。
- CFD流/固热耦合计算考虑了油的升温过程及空间分布对电机部件温度的影响，比Abaqus（恒定热边界）计算结果精度更高。



# 油冷电机散热分析案例

## 不同孔数方案绕素覆盖率对比:



# 总结

- ANSYS家族产品（流体、结构、电磁等）为可电机分析提供全套解决方案。
  - ANSYS Fluent R17强大的几何和网格处理功能，可以快速进行电机多固体域和流域的复杂模型建模，并方便实现共轭传热计算。
  - ANSYS Fluent流场（含VOF）与温度场计算解耦方便，可大大加快计算收敛速度；
  - 统一平台下不同模型间快速精准的数据映射和灵活的耦合方式。
  - 全球统一的工程师和专家队伍提供技术支持。

# 谢谢！

艾迪捷信息科技(上海)有限公司

[www.idaj.cn](http://www.idaj.cn)

北京

地址：北京市朝阳区光华路甲14号诺安基金大厦1601室，  
100020

电话：010-65881497/98

传真：010-65881499

上海

地址：上海市浦东新区张杨路620号中融恒瑞国际大厦东楼  
2001室，200122

电话：021-50588290/91

传真：021-50588292