

The ANSYS logo is displayed in a black rectangular box. The word "ANSYS" is written in a bold, sans-serif font, with "AN" in white and "SYS" in gold. A registered trademark symbol (®) is located at the top right of the word.

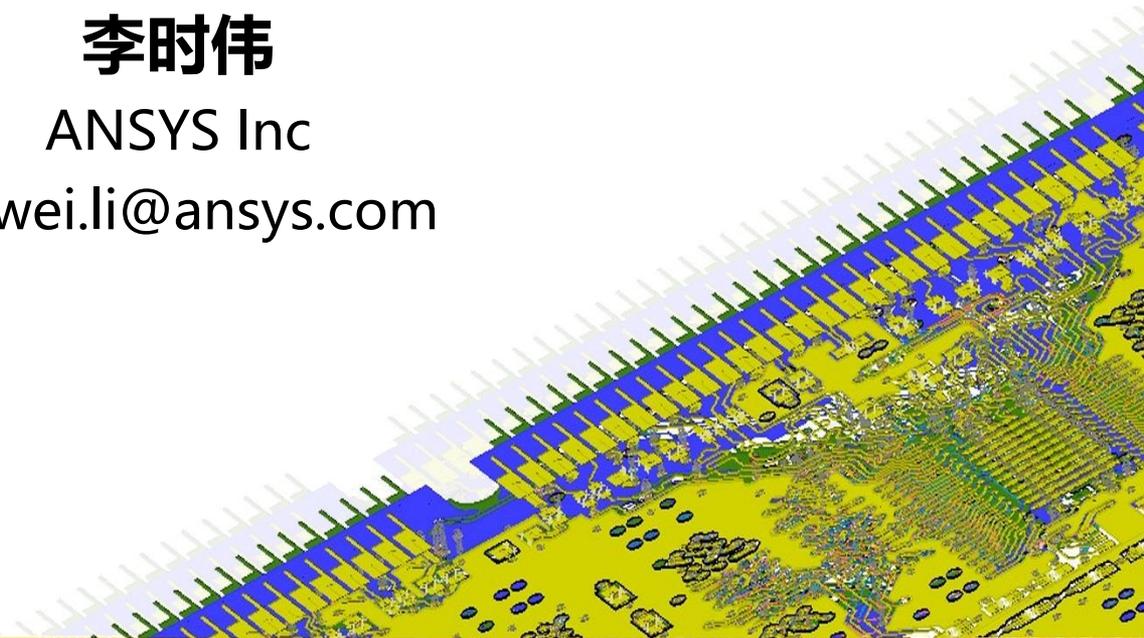
ANSYS®

ANSYS软件在电机设计中的最新进展

李时伟

ANSYS Inc

shiwei.li@ansys.com



ANSYS 公司

- ANSYS成立于1970。
- ANSYS 致力于工程仿真软件的开发、销售和技术支持，通过仿真预测产品在真实环境下的行为模式和制造过程。
- 世界领先的电磁、结构、流体、芯片和嵌入式系统仿真软件供应商



ANSYS 公司历史

ANSYS

John Swanson 博士创建ANSYS的前身SAS公司 1970
SAS发布ANSYS/EMAG 3D软件 1983
SAS收购FLOTRAN和Compuflo公司1992
与TA Associates公司合并，正式更名为ANSYS Inc. 1994
ANSYS Inc. 在NASDAQ上市 1996
收购ICEM CFD 公司 2000
收购CADOE公司 2001
收购CFX公司 2003
收购AutoDYN 软件，Century Dynamics 公司 2005
收购Fluent 公司，设立ANSYS中国分公司 2006
收购Ansoft公司 2008
收购Apache DS 公司 2011
收购Esterel Technologies S.A 2012
收购Reaction Design公司 2014
收购 SpaceClaim公司 2014

Fluent

1979 英国谢菲尔德大学发布TEMPEST (FLUENT的原型)
1983 Creara开始销售FLUENT
1995 FLUENT Inc.成立
2004 成立FLUENT 中国分公司

Ansoft

1984 卡内基 梅隆大学教授Zoltan J Cendes创立Ansoft公司
1984 发布Maxwell 软件
1990 发布高频结构仿真软件HFSS，与HP 签署OEM协议
1996 收购Compact公司，在NASDAQ上市
1997 收购MSC 公司EBU分部，设立Ansoft 北京办事处
1999 收购Pacific Numrix 公司
2000 收购Aglient HFSS软件

Apache DS

2001 Apache 公司成立，提供芯片低功耗和PI 设计工具
2006 成立成都工程研发中心
2007 收购Optimal Corporation
2009 收购Sequene Design

ANSYS 产品线

ANSYS在各个学科都拥有最先进的仿真技术，同时能实现跨越各个学科的集成化协同仿真。

系统

ANSYS Simplorer ANSYS SCADE ANSYS HPC
ANSYS Engineering Knowledge Manager ANSYS DesignXplorer



流体/热



ANSYS Fluent
ANSYS CFX
ANSYS Polyflow
ANSYS Icepak

结构



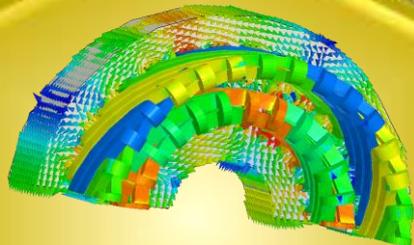
ANSYS Mechanical
ANSYS Autodyn
ANSYS LS-DYNA
ANSYS nCode

电子



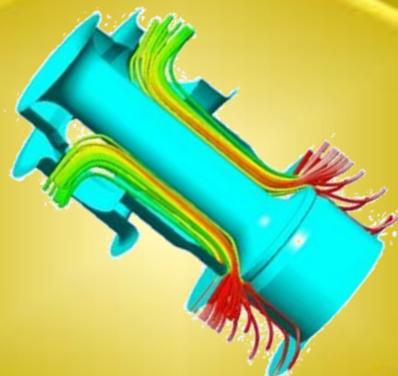
ANSYS HFSS
ANSYS Maxwell
ANSYS SIwave
ANSYS RedHawk

多物理场仿真



Time: 40.100s
Speed: 1669.20001rpm
Current: 3.0176000A

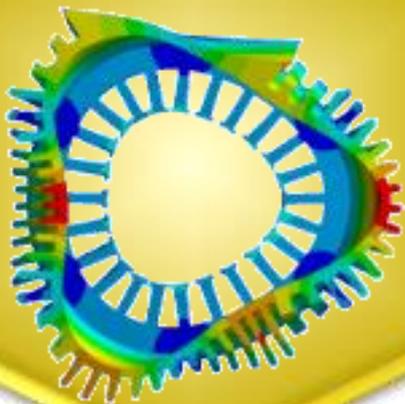
Electromagnetic



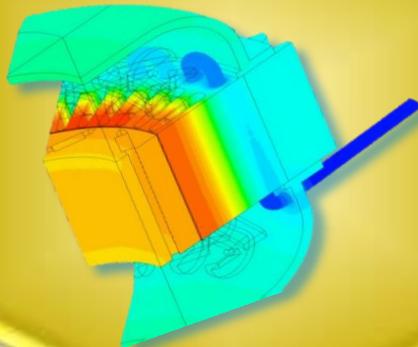
Fluid Flow



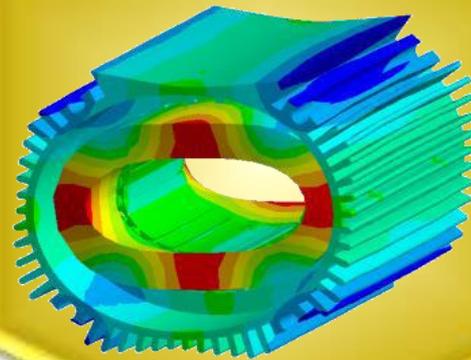
Structural



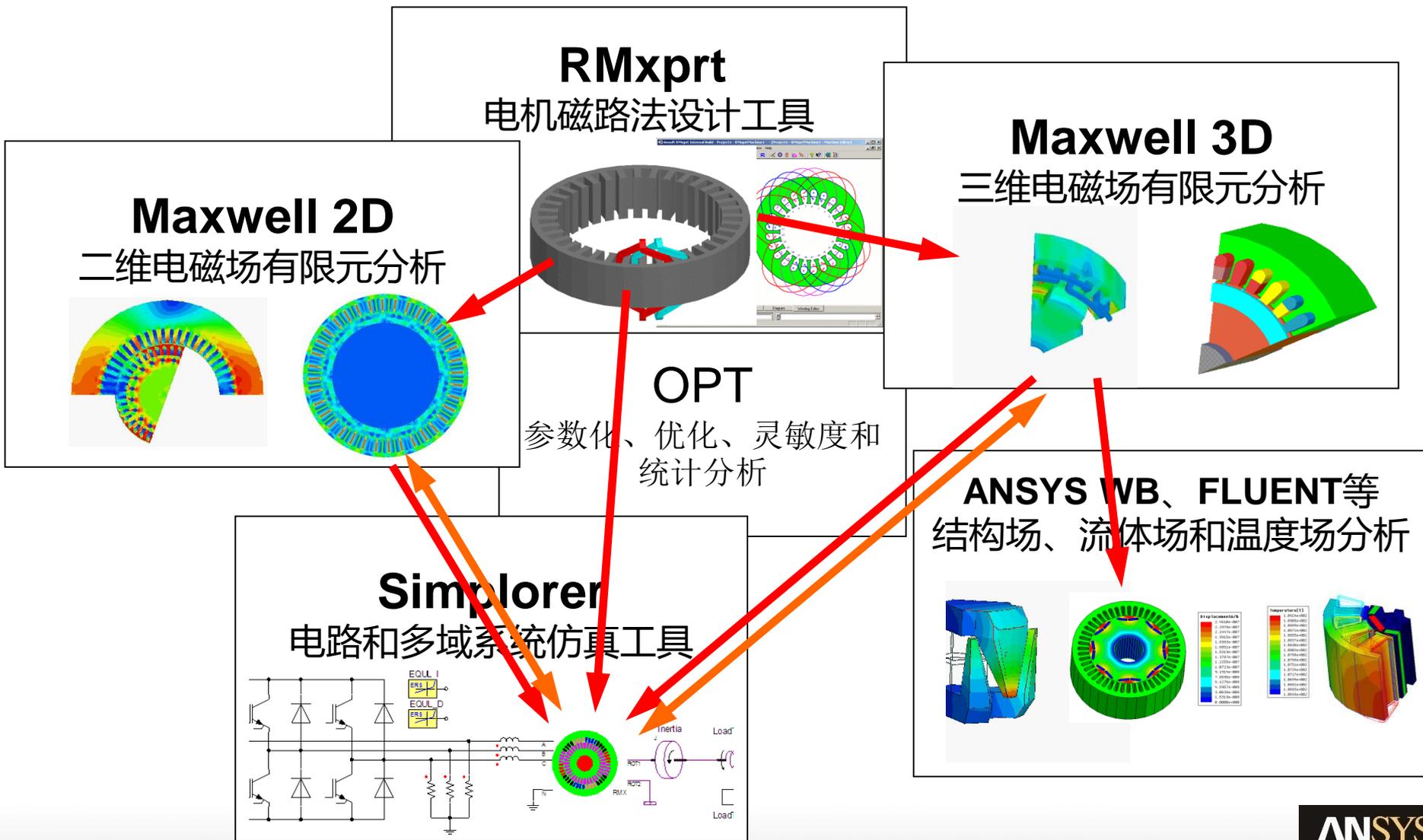
Thermal



Noise

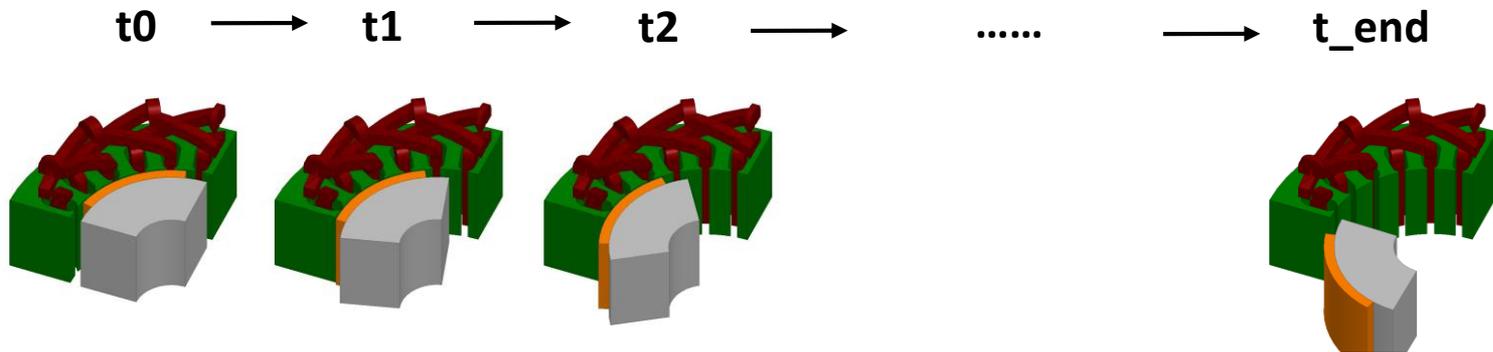


ANSYS电机设计流程



全新的时间分解法加速算法 TDM

- 一般情况下，我们认为瞬态磁场求解器必须按照时间顺序，一个时间点接着一个时间点，按序求解：



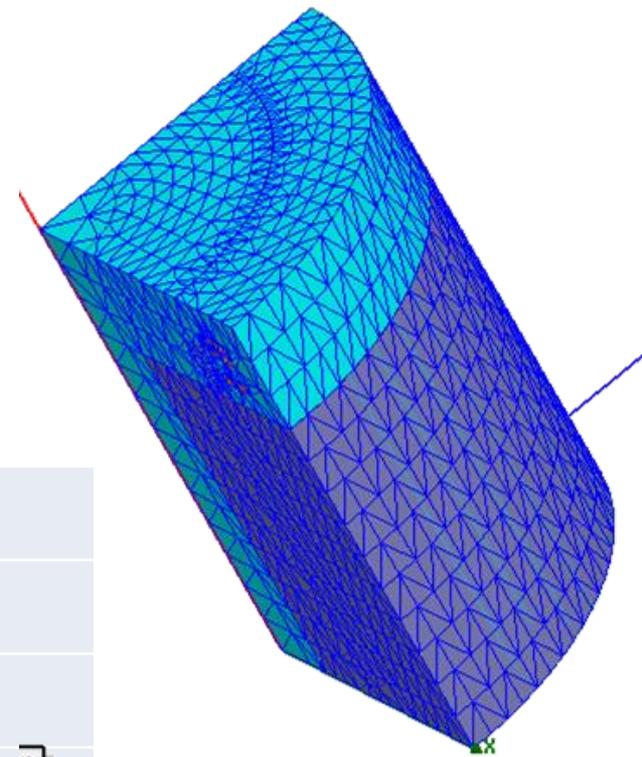
- 在求解时间点 t_n 之前，必须要先求解 $t_{(n-1)}$
- 每一个时间点，用户可以使用多个处理器，共享内存，并行求解
- 对于中小规模的计算模型，一般不超过8个处理器；大型和特大型计算模型，可能会用到16~32或更多的处理器

TDM：大大提高求解速度

- 当求解一个子任务时，Maxwell会将所有的时间步长分配到所有可利用的任务上



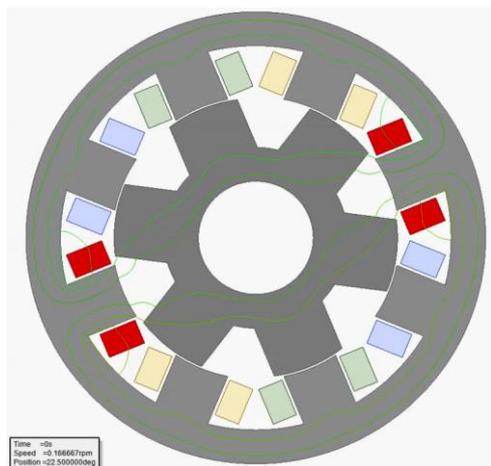
TDM求解速度实测



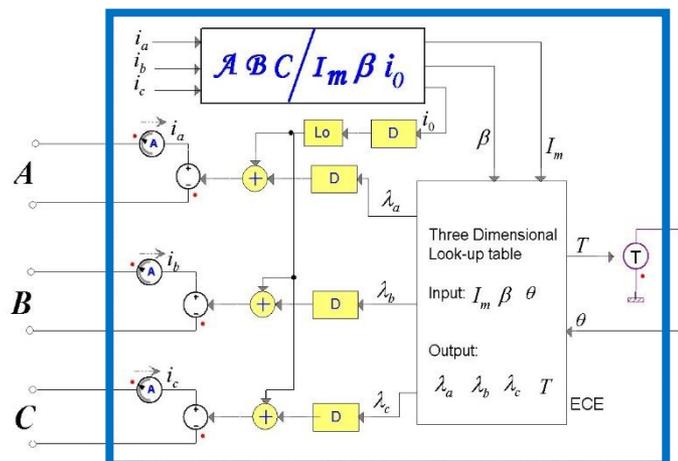
Cores	CPU time	Elapsed time	时间步
1	11:51:47	12:55:37	500
2	7:39:04	8:41:59	500
4	5:02:29	6:01:38	500
8	3:44:07	4:44:45	500
16	4:07:46	5:08:51	500
TDM39:39	2:10:31	2:11:22	$39 * 13 = 507$
TDM78:78	1:27:22	1:27:36	$72 * 7 = 504$

ECE :等效电路提取

- 分布参数→集总参数 (B , J , D→Flux, Current, Torque) ;
- 高速度 : 电路模型 ;
- 高精度 : 以场分析为基础 ,
- “黑盒子” 系统仿真分析模型。



电气 ←→ 机械



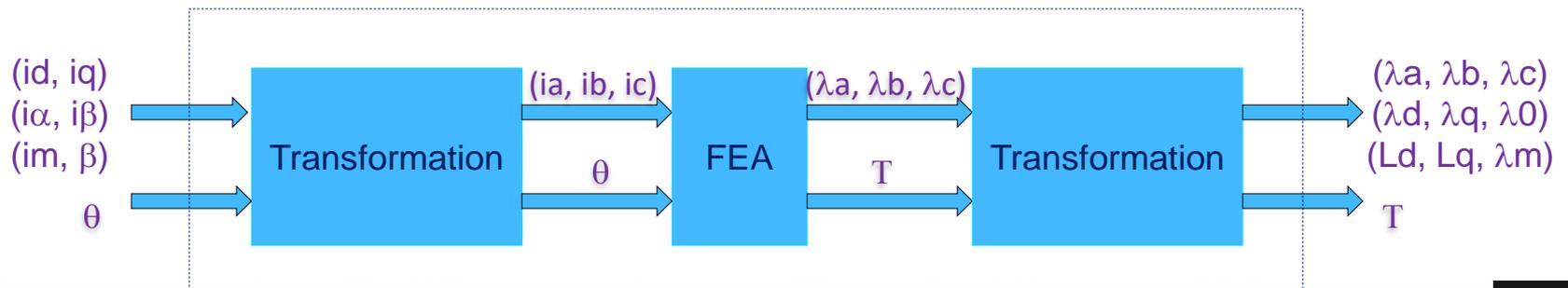
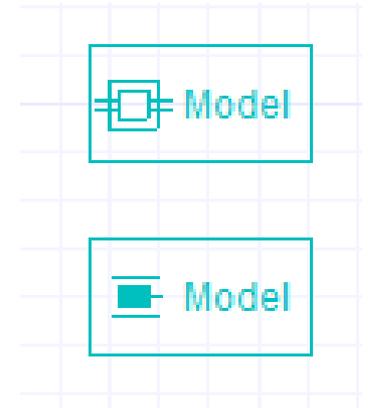
已扩展到直线运动和变压器

■ ECE提取功能

- ECEW_Model: one winding model (R16)
- ECE3_Model: three-phase model (R16)
- ECER_Model: rotation model (R16)
- ECEL_Model: linear motion model (R17)
- ECET_Model: transformer model (R17)

■ ECE 模型格式

- Simpler model in file .sml
- Look-up table output
- VHDL model



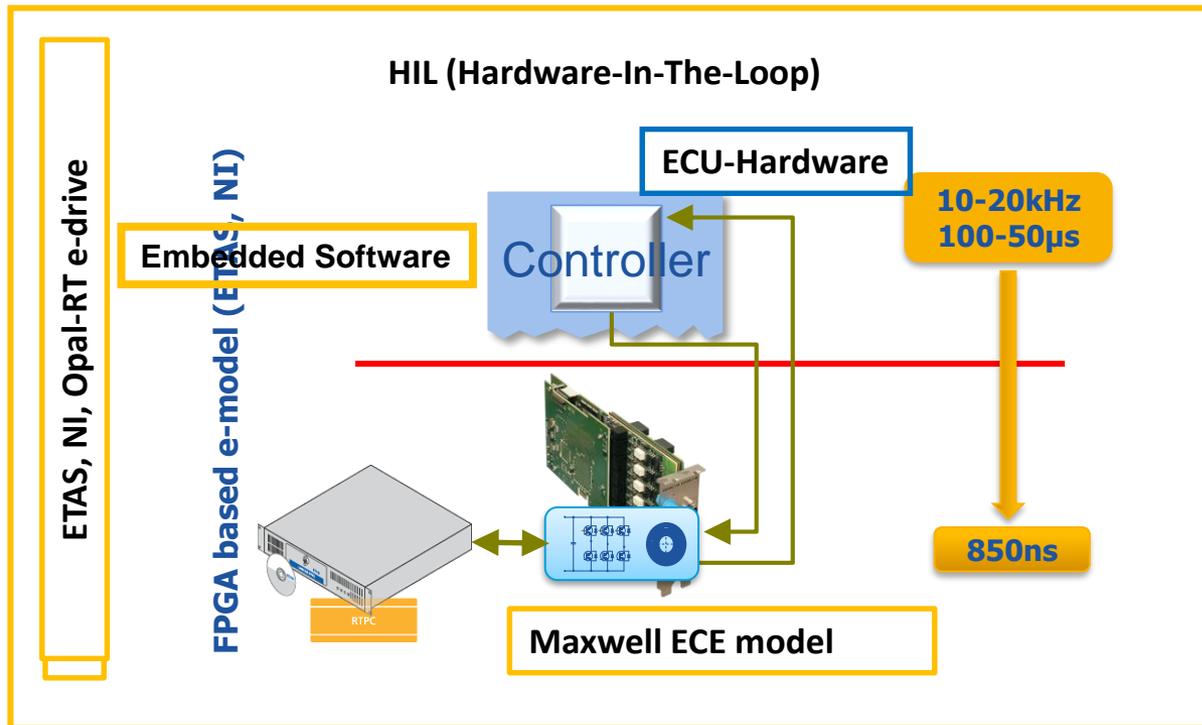
基于模型设计的有限元分析

- 工程需求：MIL, SIL, HIL
- Maxwell功能：ECE

ETAS

OPAL-RT
TECHNOLOGIES

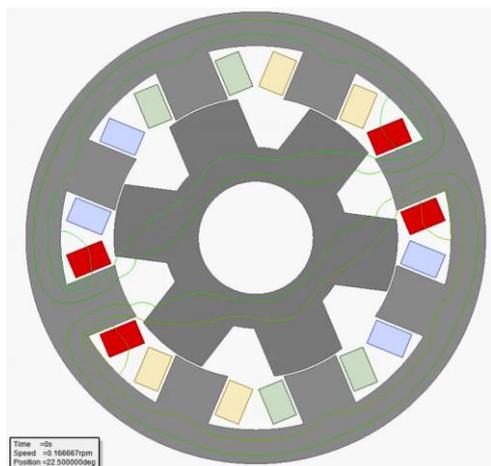
NATIONAL
INSTRUMENTS



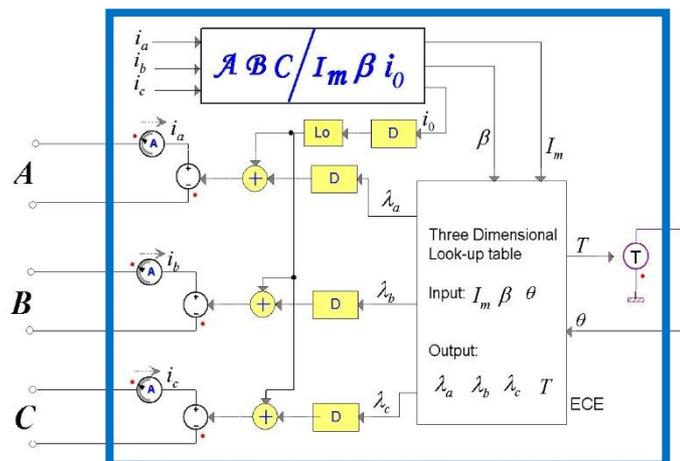
ANSYS®

ECE 等效电路模型抽取

- 分布参数 → 集总参数 ($B, J, D \rightarrow \text{Flux, Current, Torque}$) ;
- 高速度 : 电路模型 ;
- 高精度 : 以场分析为基础 ,
- “黑盒子” 系统仿真分析模型。



电气 ←→ 机械



传统ECE等效电路模型抽取

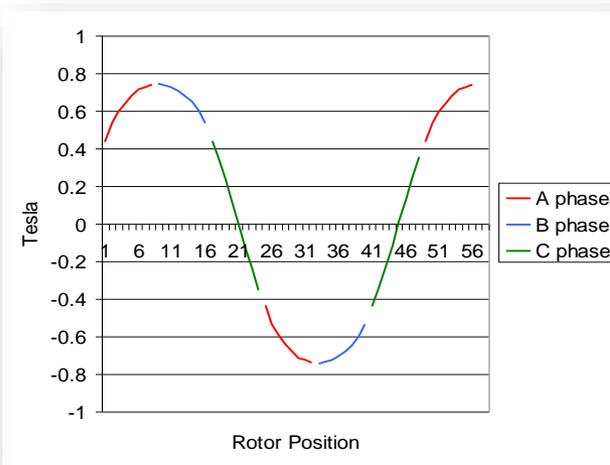
提取步骤：

- 将电流、位置等参数化设置为可变参数，建议使用DSO；
- 手动完成“最小周期”参数化扫描设置；
- 手动完成“全周期”数据还原；
- 手动完成3相（ABC）到2相（ $I_m \delta$ ）坐标变换。

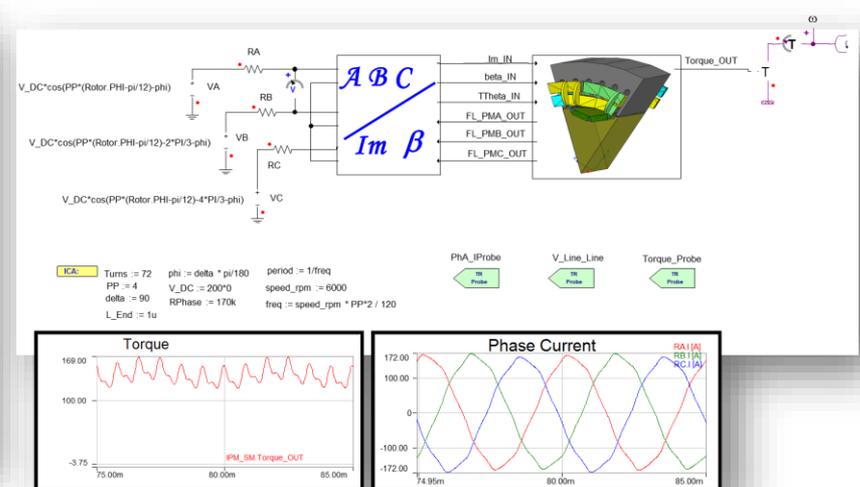
参数扫描

Setup Sweep Analysis				
Sweep Definitions				
*	Gamma	Im	Thet	
1	0deg	-10A	0deg	
2	0deg	-10A	10deg	
3	0deg	-10A	20deg	
4	0deg	-10A	30deg	
5	0deg	-10A	40deg	
6	0deg	-10A	50deg	
7	0deg	-10A	60deg	
8	10deg	-10A	0deg	
9	10deg	-10A	10deg	
10	10deg	-10A	20deg	
11	10deg	-10A	30deg	
12	10deg	-10A	40deg	
13	10deg	-10A	50deg	

全周期数据还原



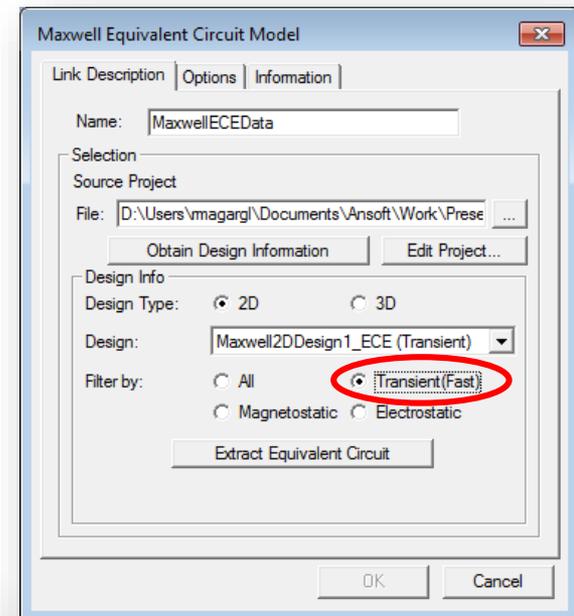
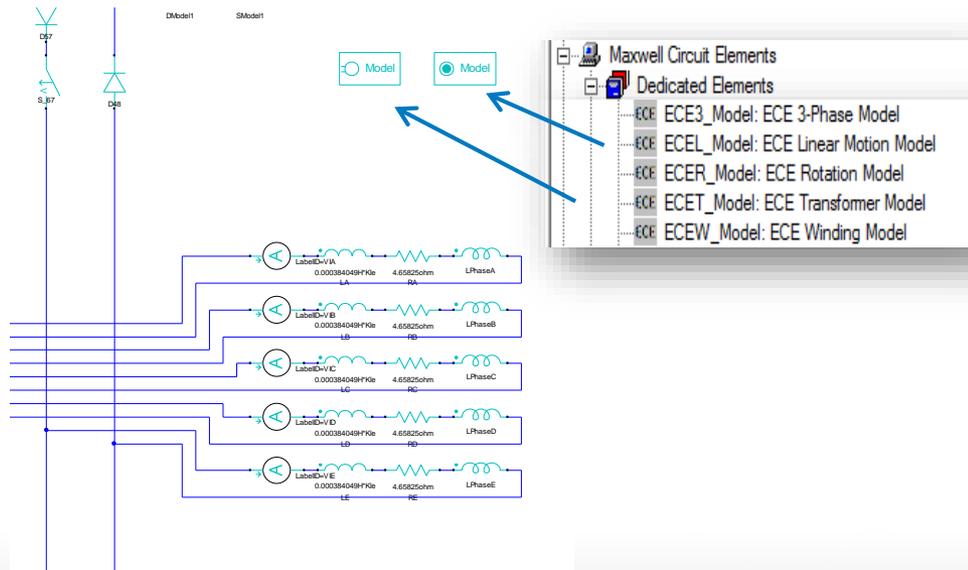
电路与系统集成



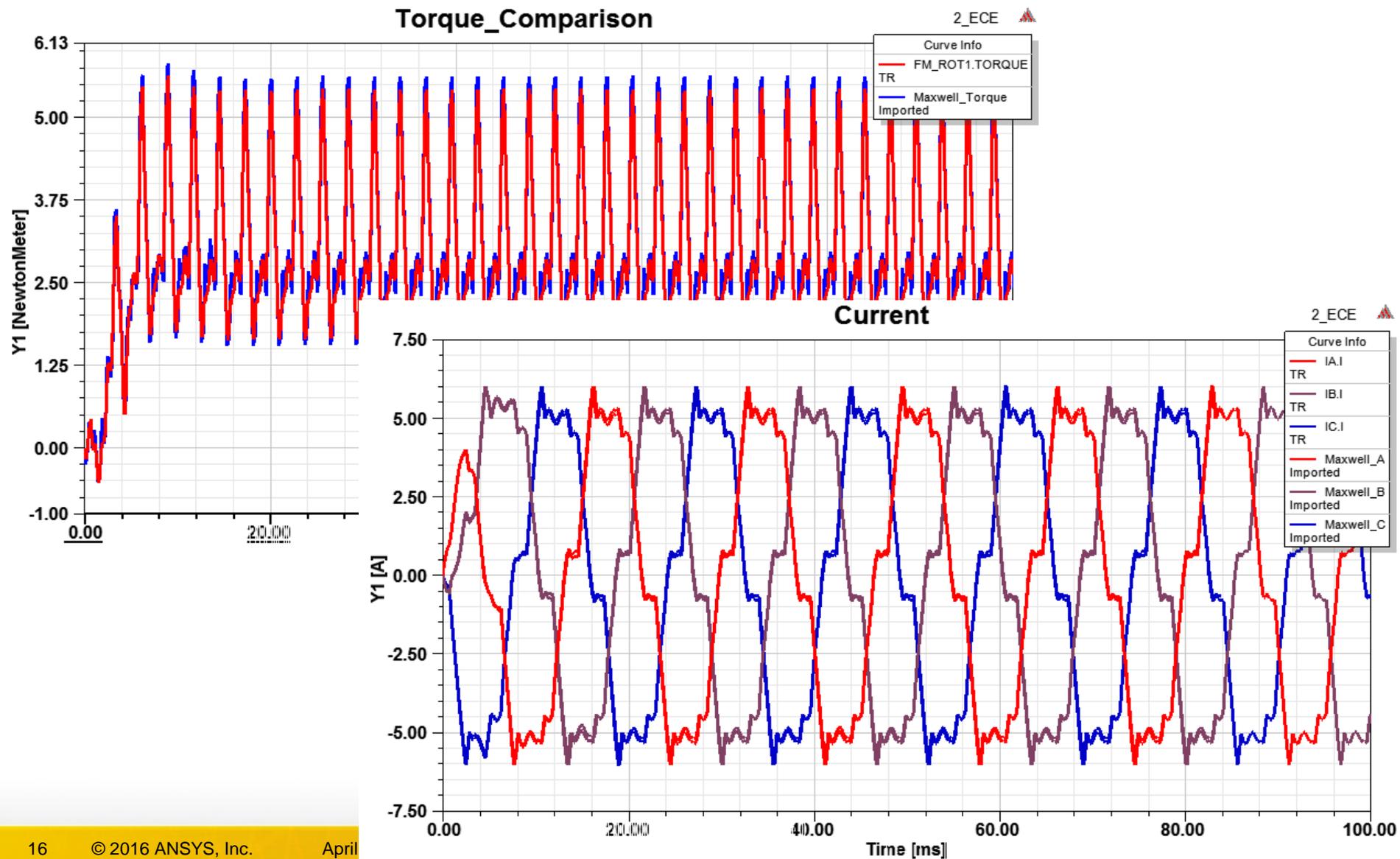
新型ECE等效电路模型抽取方法

提取步骤：

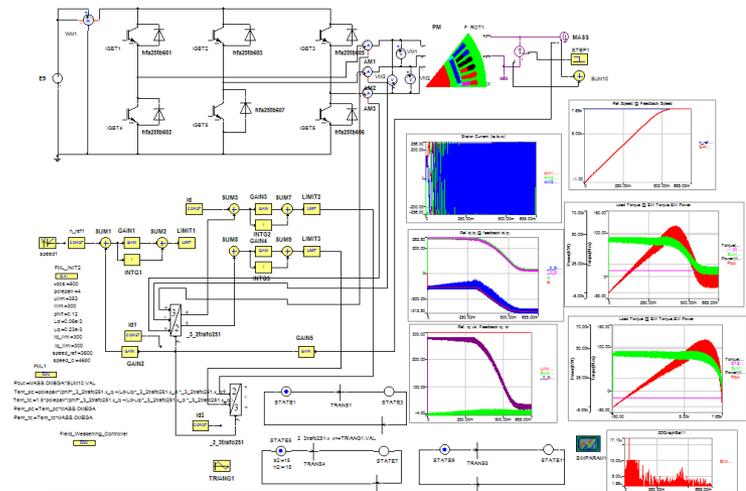
- 不需设置“Optimetrics”设置
- 不需要使用 DSO
- ECE参数扫激励设置为外电路
- ECE模型和Simplorer可实现动态链接



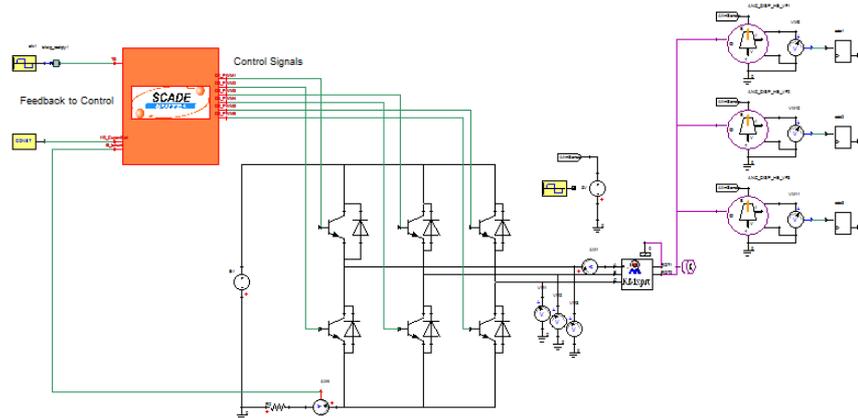
ECE电路模型 VS Maxwell 瞬态分析模型



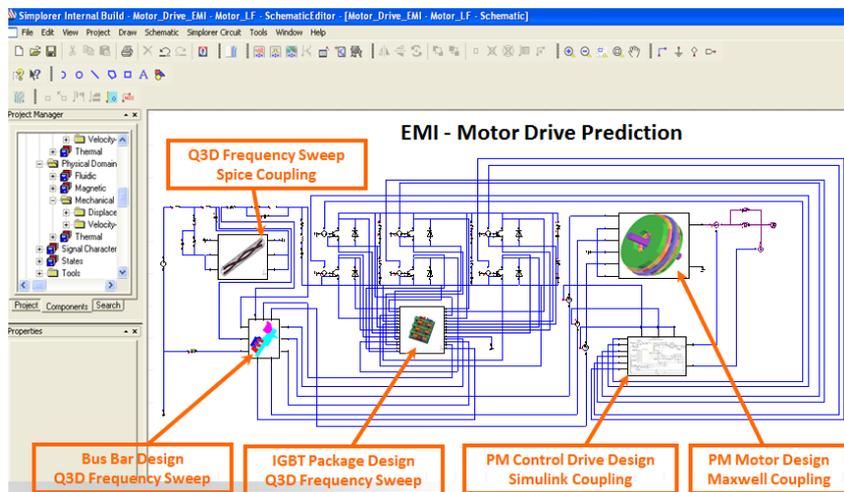
电机控制及其机电系统仿真



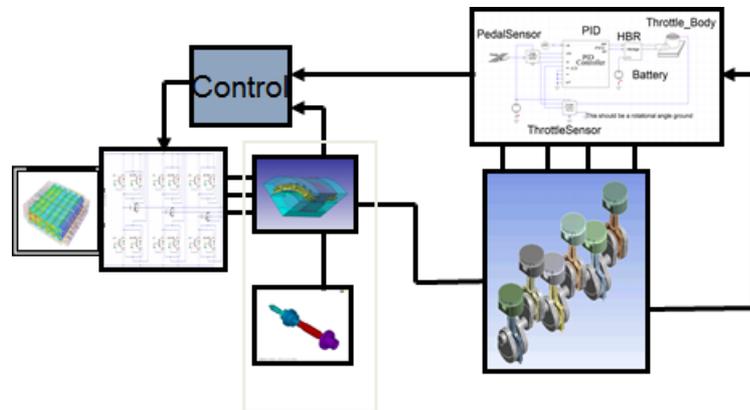
IPM电机弱磁控制



电机控制系统嵌入式代码生成



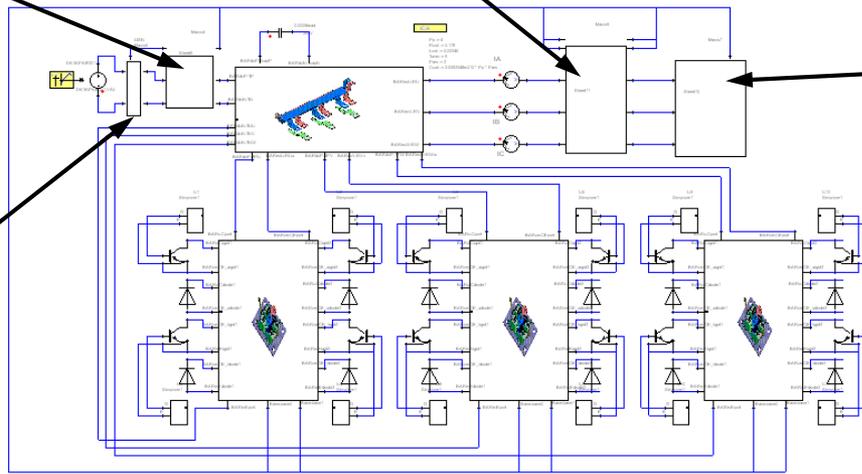
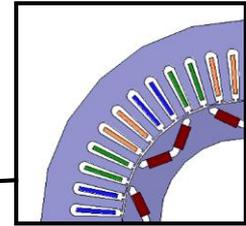
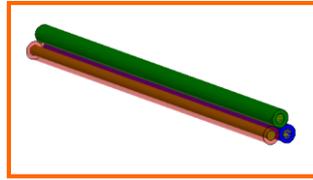
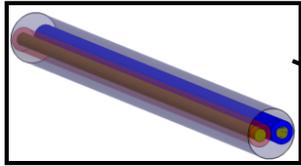
电机控制系统传导干扰分析



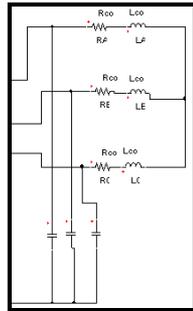
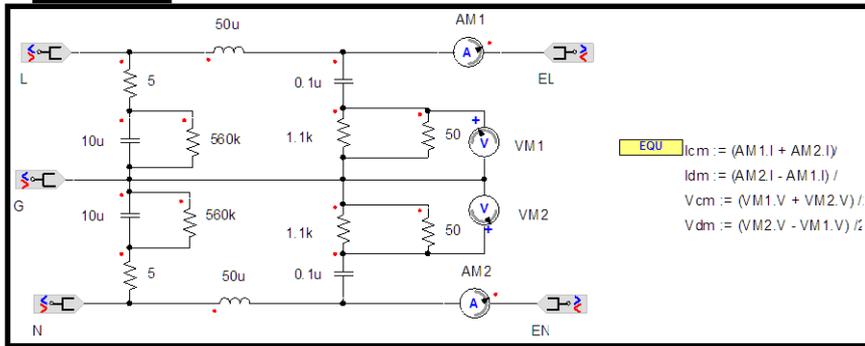
多域系统仿真



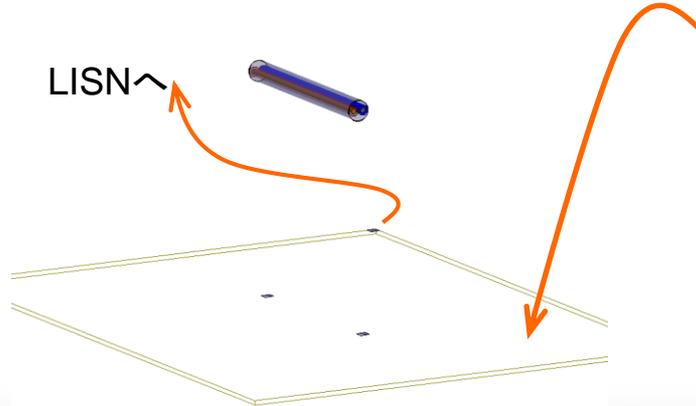
电机驱动系统传导干扰分析



LISN



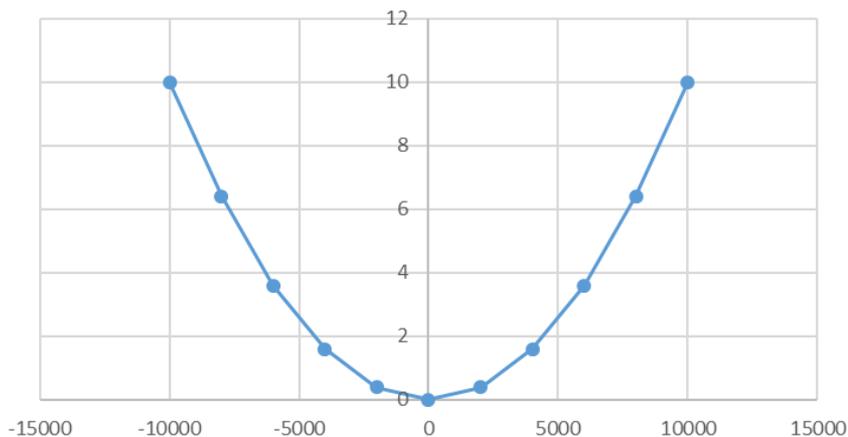
LISN



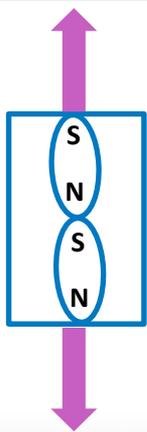
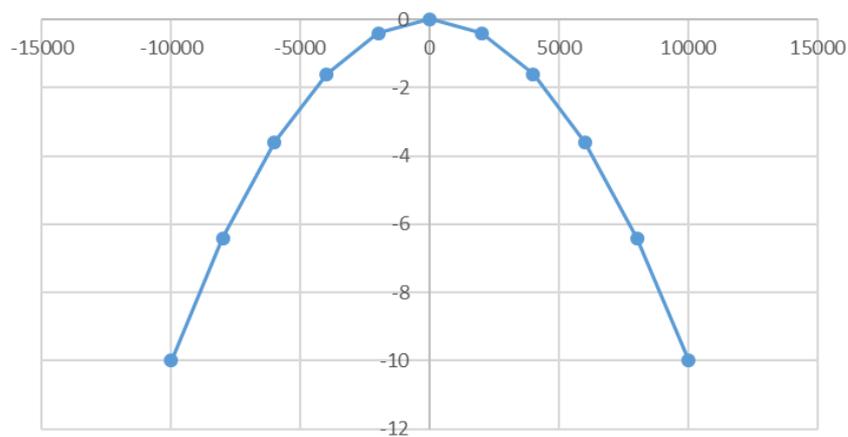
磁致伸缩的基本原理

磁致伸缩是指铁磁物质由于磁化状态的变化，其尺寸在各方向发生变化

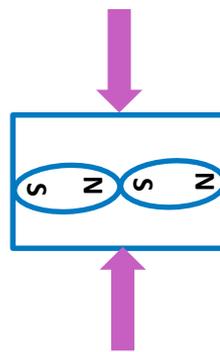
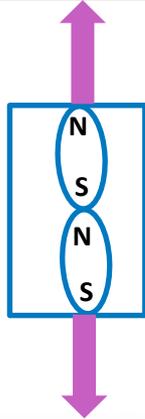
Magnetostriction vs. Magnetic Field



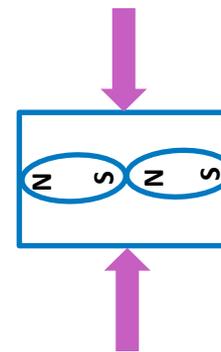
Magnetostriction vs. Magnetic Field



拉伸应力



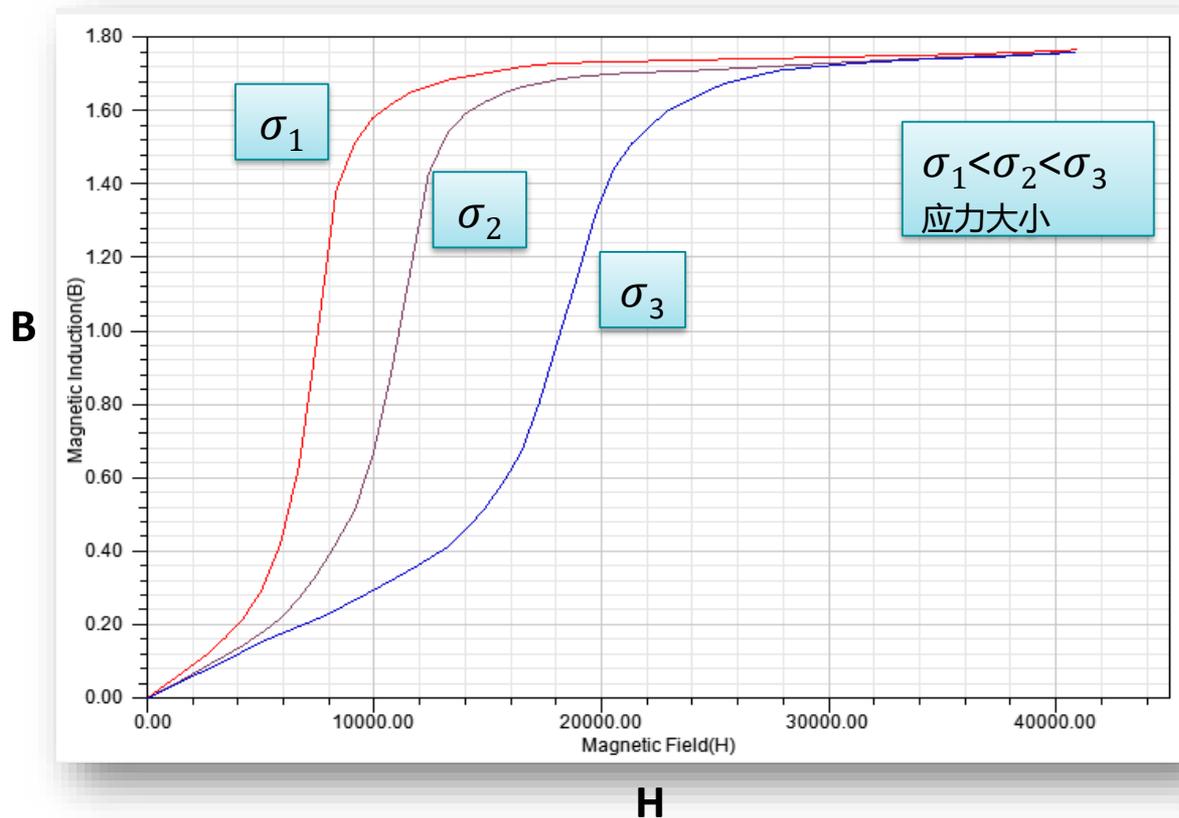
压缩应力



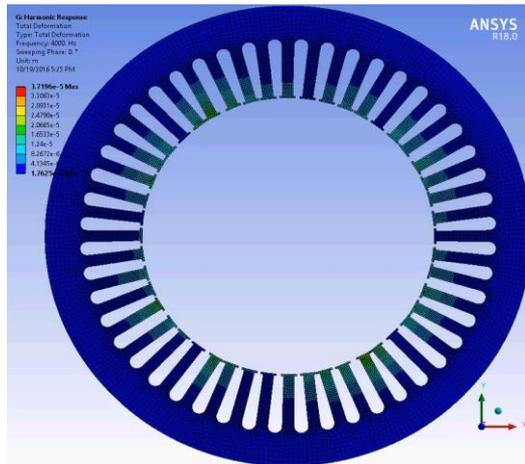
ANSYS

磁致伸缩的基本原理

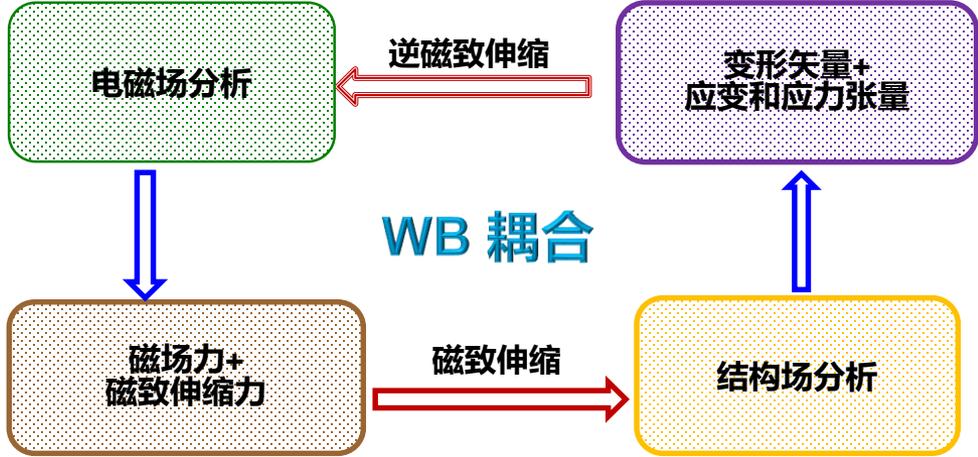
逆磁致伸缩效应（也称为反向磁致伸缩效应或维拉里效应）表示铁磁材料在机械应力的作用条件下，磁性性能会发生变化



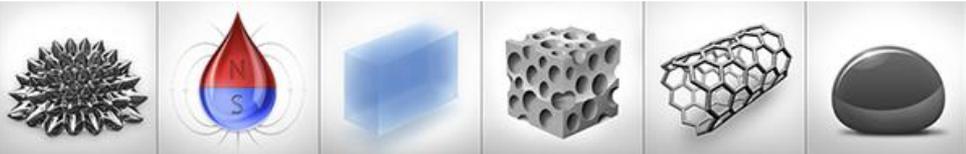
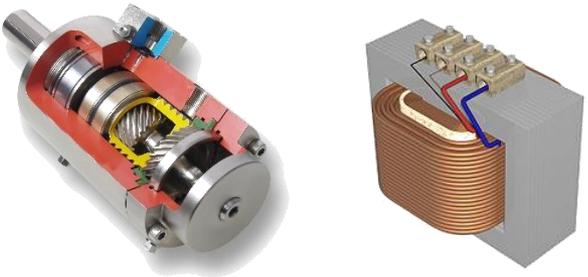
磁致伸缩的分析过程



在机械应力的作用下，磁性能会发生变化

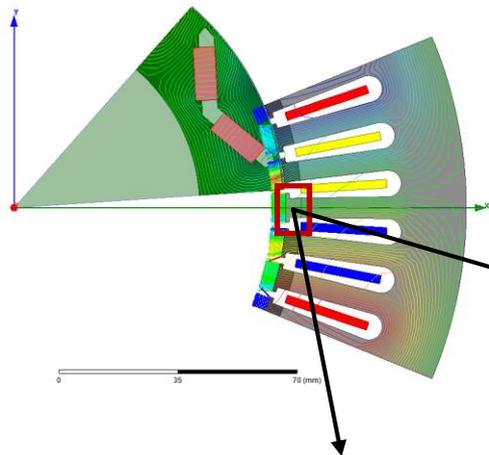


在磁场的作用下，几何尺寸会发生变化

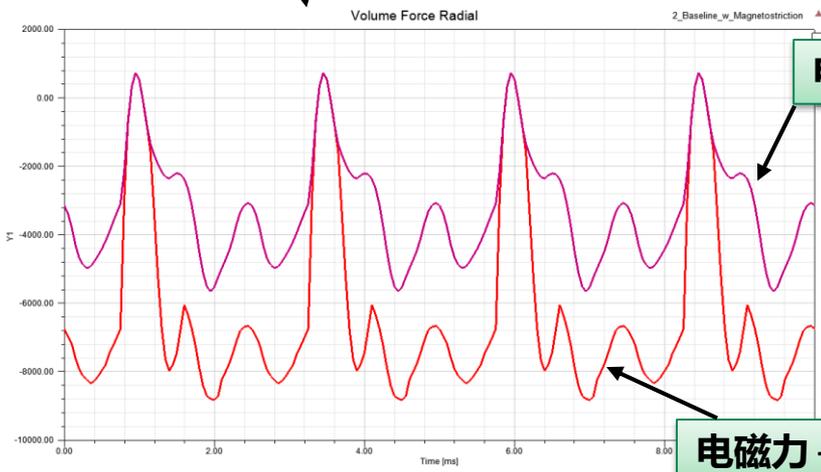
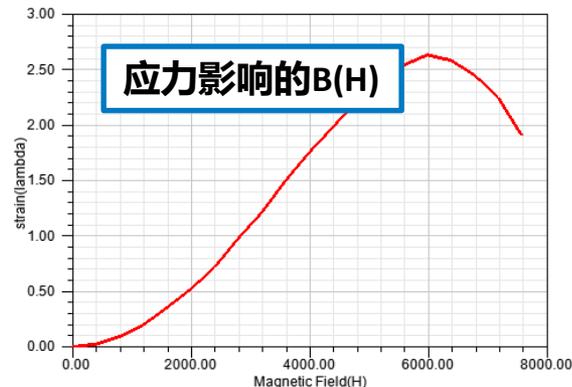


- 应用：**
- 振动和噪声分析
 - 变压器
 - 电机
 - 作动器
 - 控制设备
 - 传感器
 - 智能材料

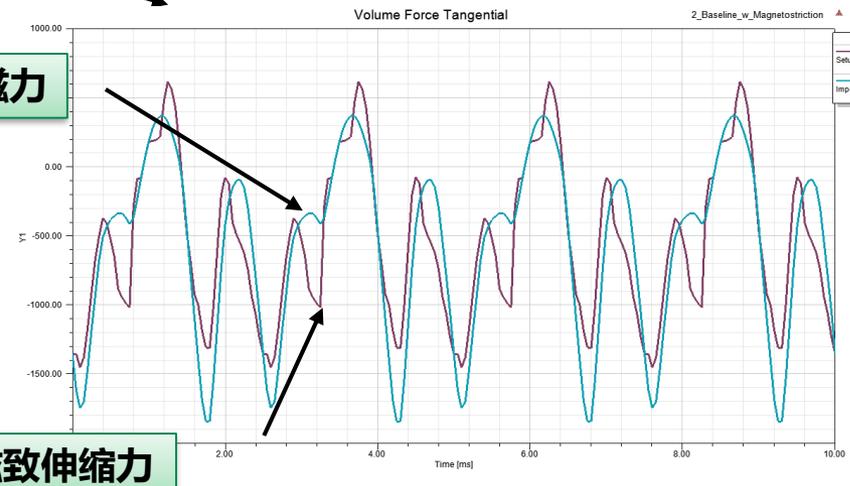
考虑磁致伸缩效应的力计算



- 瞬态场分析
- 齿尖的受力分析
- 可以用于NVH分析



齿尖的径向合力



齿尖的切向合力

更快的3D瞬态求解

Maxwell 运用多项技术，来提高求解速度

- 核心算法的持续优化
- HPC (时间分解法TDM)
- 更均匀的网格剖分 (TAU, Clone Mesh)

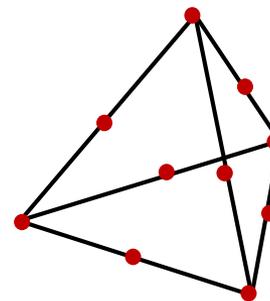
除此以外，引入一阶形状函数网格

- 更快的仿真速度
- 更少的内存消耗

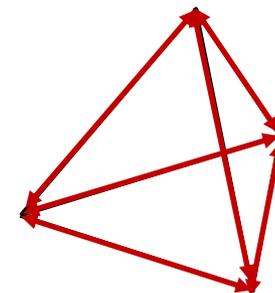
用于加快3D瞬态分析的一阶网格

通常，Maxwell 使用 τ - Ω 方程

- τ 代表矢量位，使用一阶边单元（涡流区域），涡流可以由 τ 推导得到
- Ω 代表标量位，使用二阶节点单元， H 可以由 τ, Ω 推导得到



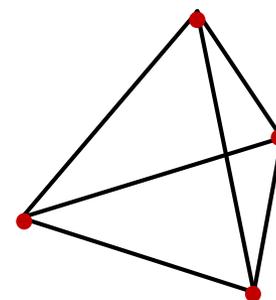
Ω 使用的节点单元(二阶)



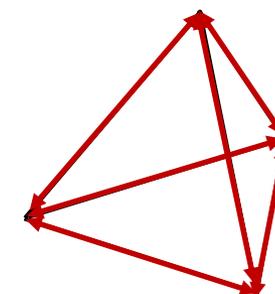
τ 使用的边单元(一阶)

现在，有一种新的选择:

- τ 仍然使用一阶边单元
- Ω 使用一阶节点单元



Ω 使用的节点单元(一阶)



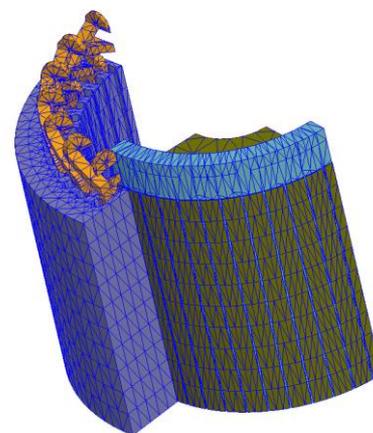
τ 使用的边单元(一阶)

用于加快3D瞬态分析的一阶网格

感应电机

57k 网格 – 500 时间步

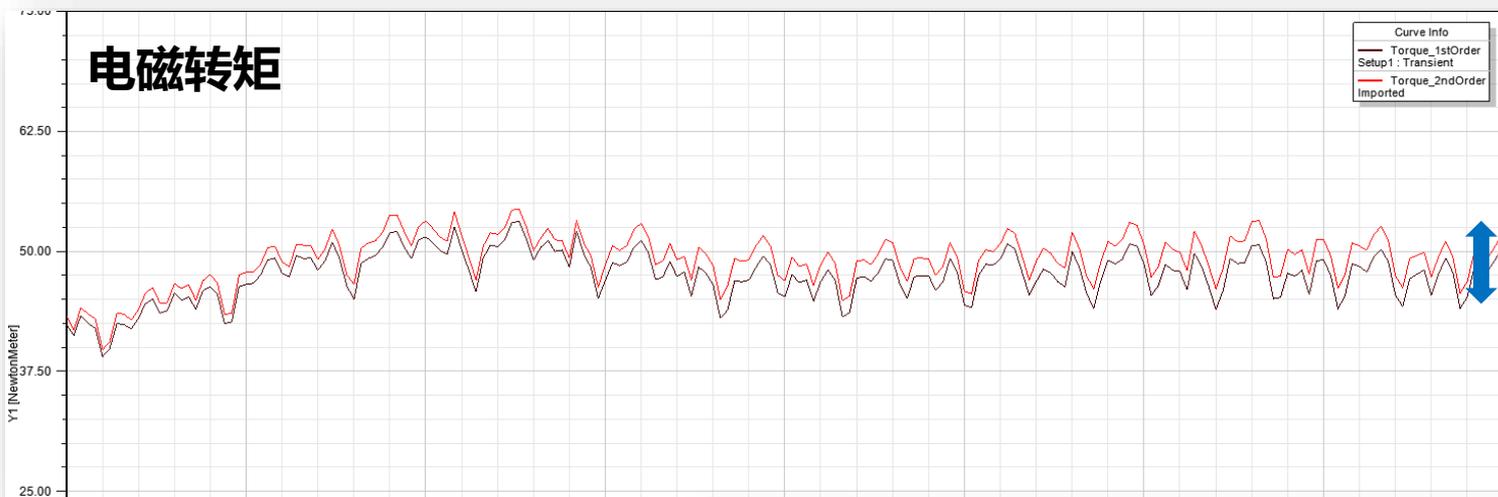
没有使用 TDM



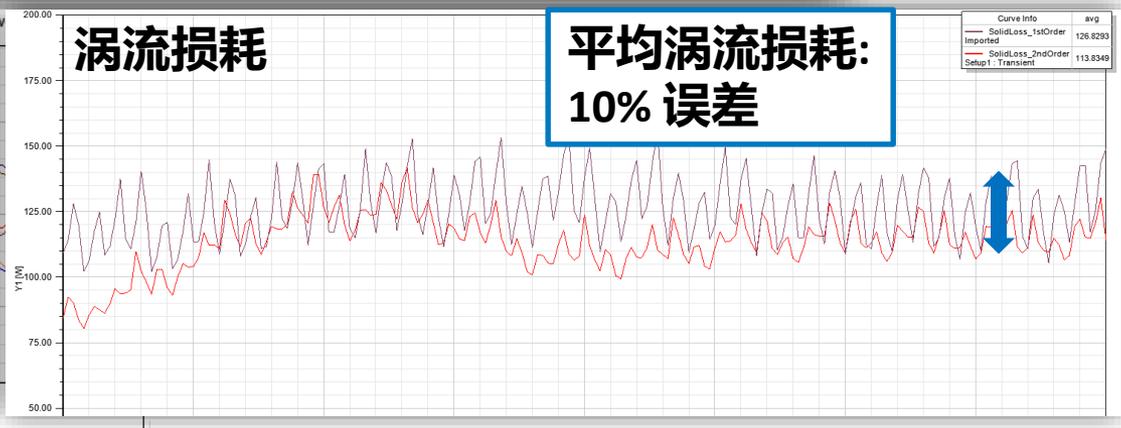
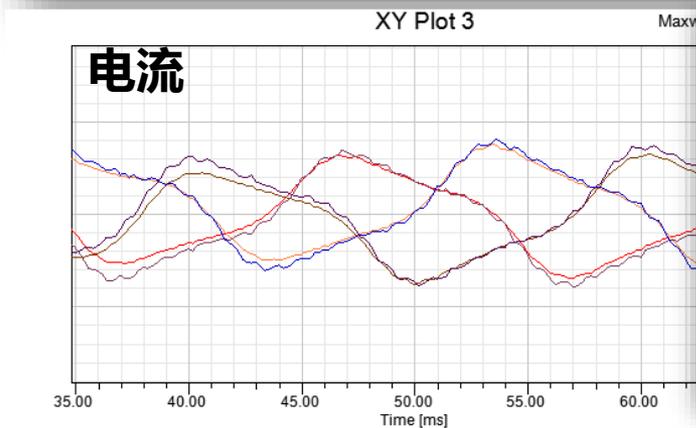
	矩阵规模	求解时间
一阶网格单元	14,700	1h11m
二阶网格单元	84,000	3h45m

比较

相同的网格剖分，使用一阶网格的时候，可以得到精度非常高的转矩、电流、磁通，但是涡流损耗的精度相对会差一些



平均转矩：
1% 误差



平均涡流损耗：
10% 误差

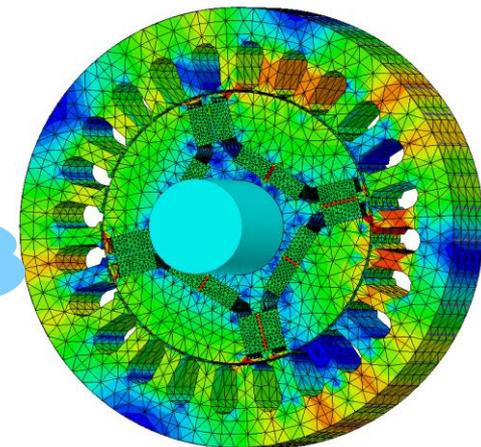
用于加快3D瞬态分析的一阶网格

IPM

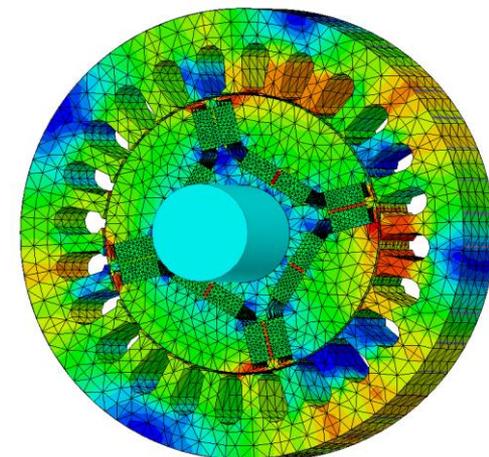
460k 网格 – 1000 时间步

没有使用 TDM

	矩阵规模	求解时间
一阶网格单元	337,000	24h
二阶网格单元	892,000	91h

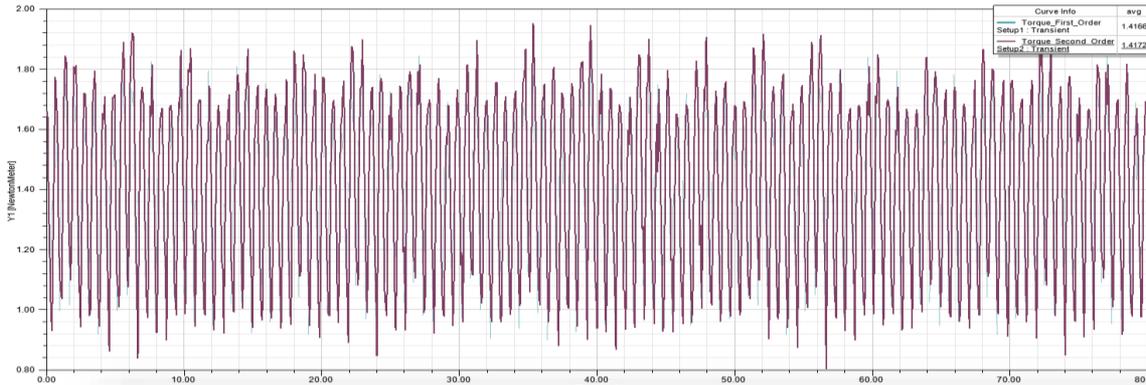


二阶

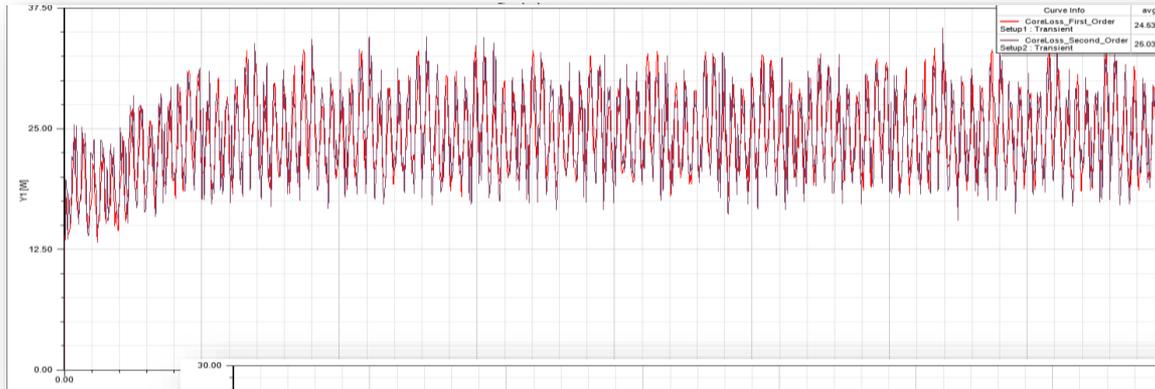


一阶

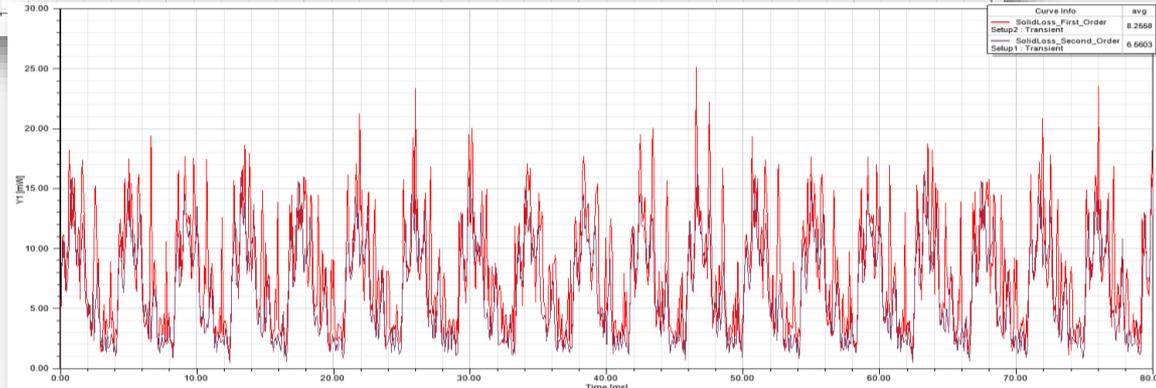
比较



平均转矩：
1% 误差

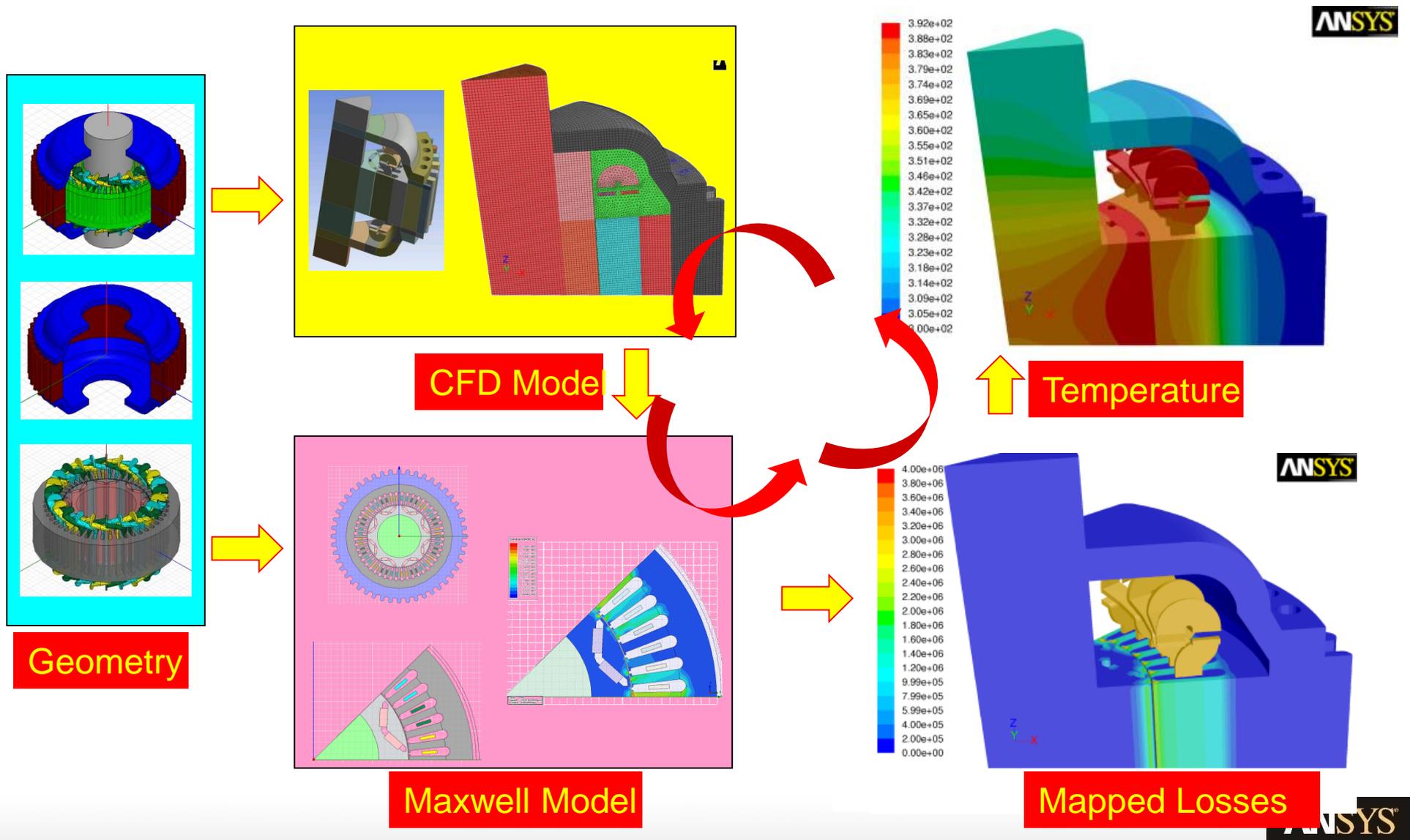


铁耗：
<2% 误差



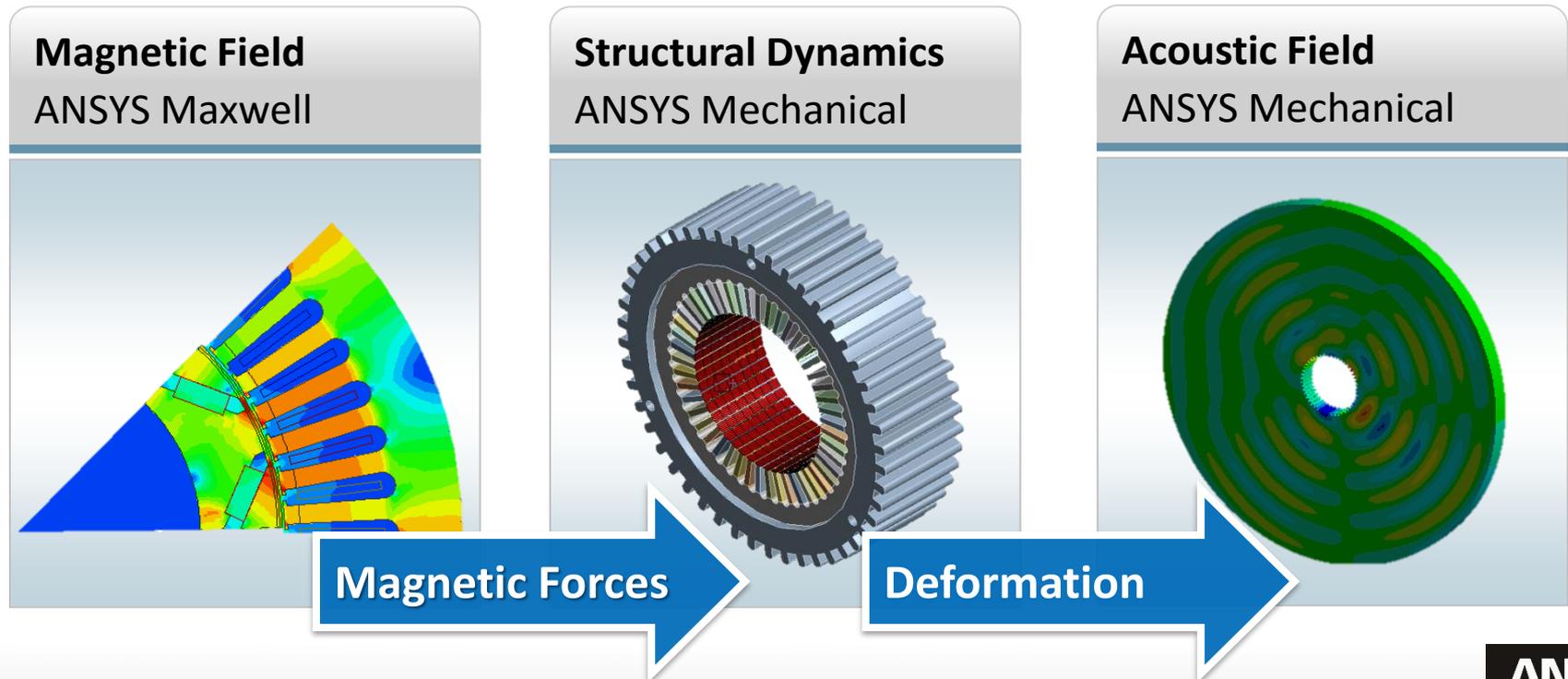
涡流损耗：
26% 误差

电机温升、散热分析流程



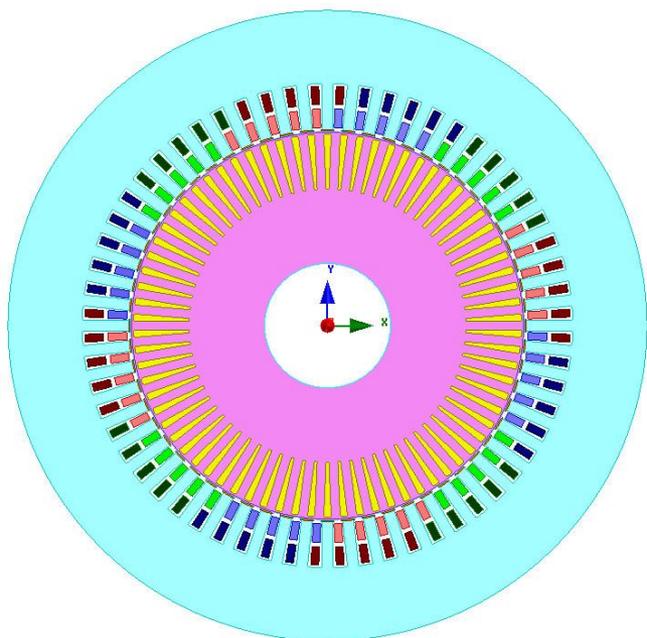
ANSYS 振动和噪声仿真

- **功能强大的振动和噪声求解技术**
 - 高度集成化的仿真流程
 - 分布式求解、HPC与GPU共同加速计算
 - 内嵌于Workbench的噪声计算模块

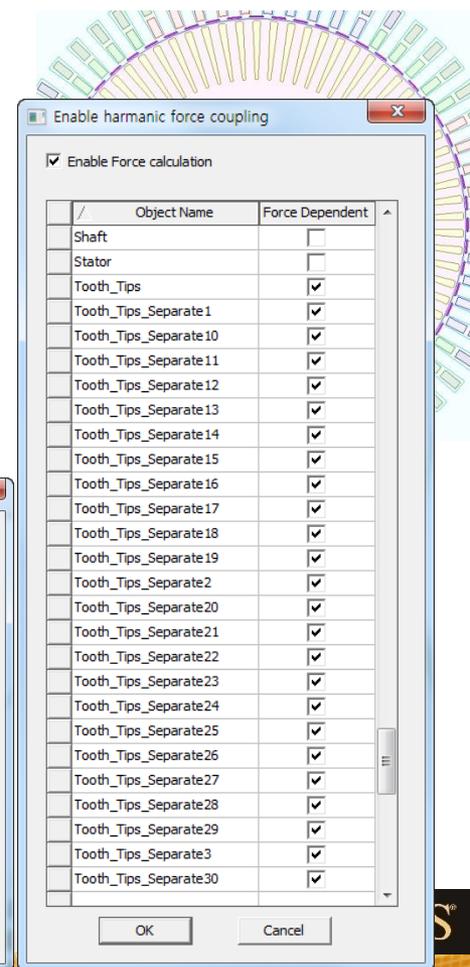
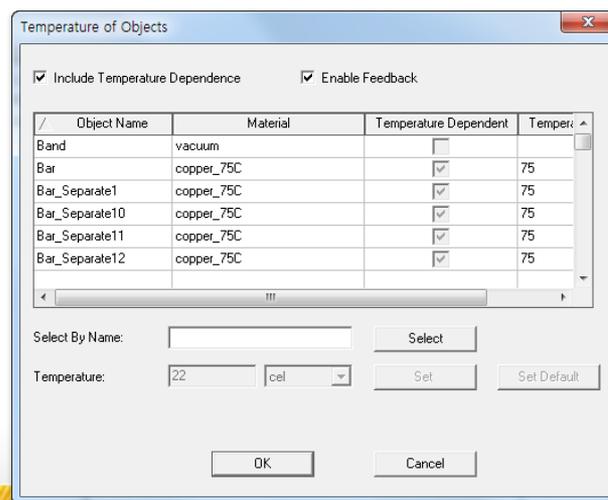


Maxwell 2D 模型

- EM Model from RMxpert



- ToothTips for Vibration Analysis



Maxwell 2D 与 FLUENT 3D 耦合

The screenshot shows the ANSYS Workbench interface for a project named 'Telsa_Coupling'. The Project Schematic displays two models: 'A' (Maxwell 2D) and 'B' (Fluent 3D). A connection line links the 'Setup' component of model A to the 'Setup' component of model B. The 'Fluent Launcher (Setting Edit Only)' dialog is open, showing the following settings:

- Dimension: 3D
- Options: Double Precision, Meshing Mode
- Display Options: Display Mesh After Reading, Embed Graphics Windows, Workbench Color Scheme, Do not show this panel again
- Processing Options: Serial, Parallel
- Show More Options:

Below the dialog, a table lists material properties for various parts:

	Density (kg/m ³)	Cp (j/kg-k)	Thermal Conductivity (w/m-k)	Part
air	1.225	1006.43	0.28556	Air gap
water	998.2	4182	0.6	Two cooling line
copper	8978	381	387.6	coil, rotor bar, rotor coil ring
steel	8030	502.48	16.27	rotor, stator
SCM	770	477	42.7	Shaft

THANK YOU

