

ANSYS Maxwell R16 助力高性能永磁电机仿真分析

撰文 / ANSYS China 中国深圳分公司 庄百兴

本文基于 CAE 行业高速发展的电磁场数值计算工具——ANSYS Maxwell 有限元软件，运用最新仿真技术对永磁同步电动机磁钢涡流损耗计算、与控制电路场合协同等研究热点进行软件应用分析，帮助用户获得高效仿真分析方法和手段。

一、引言

现代高性能永磁电机主要由永磁电机本体和驱动控制器构成，永磁同步电动机具有结构简单、体积小、重量轻和高效节能等一系列优点，近年来得到了迅速发展。高性能稀土永磁材料的出现，其优越的磁性能和相对较低的价格，使得高性能永磁同步电机的开发和研究成为世界各国的热点，

并在国防、工农业生产和日常生活等方面获得越来越广泛的应用。

永磁电机，特别是内嵌磁钢转子永磁电机（IPM），其结构复杂，传统的磁路法已经无法准确计算磁路和电机性能，需要借助高性能的有限元磁场求解工具提升仿真精度和效率。ANSYS Maxwell R16 在电机应用领域，有了进一

PDMWorks Enterprise 2014 Type Library	COM	5.12.0.0	True
SldWorks 2012 Type Library	COM	20.0.0.0	True
SolidWorks 2012 Constant type library	COM	20.0.0.0	True

图 10

(3) 在 OnCmd(...) 这个过程中，加入如下代码即可。

```
01) Dim sSpeical AsString = ReadConfigurationSpecificProperty("规格")
```

```
02) Dim sPiMing AsString = ReadConfigurationSpecificProperty("品名")
```

```
03) While index <= last
```

```
04) 'CounterVal = tmpArr(index).mlLongData1
```

```
05) Dim s AsString
```

```
06) 's = "PRT-" + CounterVal + "-MFG"
```

```
07) s = sSpeical + "_" + sPiMing
```

```
08) 'MsgBox(s)
```

```
09) tmpArr(index).mbsStrData1 = s
```

```
10) index = index + 1
```

```
11) EndWhile
```

其中，第 01 和 02 句为在 SolidWorks 中读取“规格”、“品名”在特定配置中的两个属性值。在第 07 句，再将两个值加起来赋值到 s。s 即为返回值——在过程 OnCmd(...) 返回这个值。

(4) 使用部分：SolidWorks 文件在 EPDM 库，被保存、另存为时，这个程序即被自动激发。生成“规格-品名”所组成的文件名。而这个规格和品名就是 SolidWorks 文件的属性。

五、结语

综上所述，这个程序本来很简单，只有几行代码，但因为它要跨越 EPDM 的 API 和 SolidWorks 的 API 组合起来，以产生自动生成 SW 文件名的结果，所以有一定的研究价值。受篇幅所限，文章仅止于此。IM

步的增强和改进，能显著提升电机研发能力。

二、永磁体涡流损耗高效精确计算

永磁电机转子与定子基波磁势是同步旋转的，因此通常计算中忽略转子内的永磁体涡流损耗。而实际永磁电机中，由于存在齿槽效应，且绕组磁动势的非正弦分布，或者由 PWM 逆变器引入高次谐波电流等，均会产生谐波磁势，从而导致基波转速下的转子永磁体及固定永磁体的金属护套中引起涡流损耗。

通常情况下，与电机定子的绕组铜损和铁损相比，转子磁钢涡流损耗占比很小。但是，由于转子散热条件相对封闭，热量不容易散发，磁钢涡流损耗可能会引起磁钢内局部高温升，从而引起永磁体局部热退磁。特别是烧结钕铁硼（NdFeB）具有较大电导率和较低的居里温度，更需要特别计算涡流损耗和校核温升。因此，设计永磁电机初期，就需要精确计算磁钢涡流损耗，保证电机磁钢稳定的热性能。

1. 涡流效应趋肤深度计算

永磁体的损耗，主要由气隙高次谐波含量在磁钢中感应涡流导致，因此，准确计算高次谐波在永磁体中的趋肤深度是精确计算磁钢涡流损耗的前提保证。本文采用 Maxwell 有限元计算直接计算磁钢损耗，而电磁场问题实现数值求解的一个关键步骤就是网格剖分。因此网格剖分的规模和质量直接影响数值计算的精度、效率和经济性。

对于较高频率的高次谐波电磁场有限元分析，计算磁钢涡流损耗首要考虑到其趋肤深度的影响。当磁场进入磁钢表面以内时，其最大值按指数规律衰减，因此，随着深度的增加，磁场也将按指数规律衰减。

磁场在导体内的趋肤深度，可由公式 1 进行计算：

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \sigma \mu}} \quad (\text{公式 1})$$

式中， δ 为趋肤深度； ω 为角频率 $=2\pi f$ ； σ 为磁钢电导率； μ 为磁钢相对磁导率。

计算不同频率下的钕铁硼磁钢的趋肤深度，结果如表 1 所示。

ANSYS Maxwell 提供了软件的易用性和方便性，能够自动依据磁钢材料、铜线等导电材料的电导率，在指定频率下自动计算趋肤深度，如图 1 所示铜线的 Skin Depth 的数据由软件自动功能自动计算出在 1KHz 下趋肤深度为

表 1 不同频率下钕铁硼永磁体的趋肤深度

频率 (Hz)	趋肤深度 (mm)
500	27.85
3,000	11.37
6,000	8.04
10,000	6.23

2.0898mm，并分为 4 层。



(a) 自动识别材料电导率

(b) 自动计算出给定频率下的趋肤深度值

图 1 ANSYS Maxwell 自动计算趋肤深度

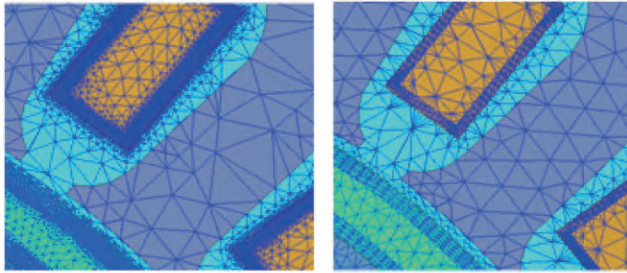
经典有限元算法为了能够达到较高的计算精度，在趋肤深度内划分的有限元网格一般来说必须足够小。但是太小的网格会增加计算机运算开销，因此 ANSYS Maxwell R16.0 中改进了趋肤深度的 TAU 网格剖分技术，优化后的趋肤深度网格能够在法向方向上体现网格极小尺寸，而垂向量方向网格尺寸依然可以足够大，既可以明显降低网格数量，又节约运算资源，数值计算结果精度与传统网格技术相当，非常适合磁钢涡流损耗仿真计算。

如图 2 所示，在二维有限元中，与传统有限元算法比较，网格数量减少到二十分之一，同样能获得几乎等值的计算精度，计算效率却成倍显著提高，所以 ANSYS Maxwell R16.0 新的 TAU 网格剖分技术优势非常明显。

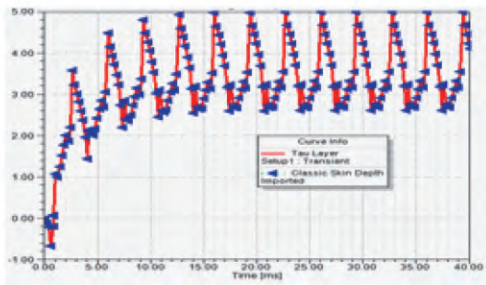
2. 周期模型网格克隆技术

永磁电机往往由多个磁极组成，且具有周向对称性，电机定子铁芯、转子铁芯和磁钢等在轴向具有拉伸对称性，为了更进一步减小网格数量，ANSYS Maxwell R16.0 在 2D 和 3D 中分别引进了全新的网格克隆技术（Clone Mesh），从周向和轴向减少网格剖分，提高网格复用性和对称性。

如图 3 所示，打开 Clone Mesh 选项，定义 4 极电机父磁钢几何位置的扇形区域，设置此区域内的 Skin Depth 选项，生成网格后的效果如图 3 右侧所示，4 个磁钢中除扇形区域之外的 3 个磁钢网格直接网格克隆而来，所以 4 个磁



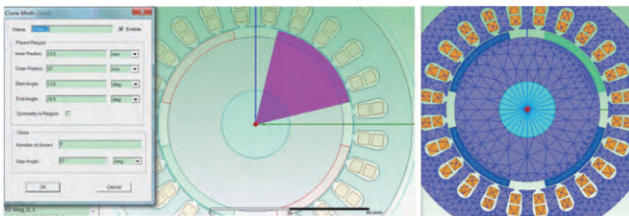
(a) 传统趋肤深度网格 (b) Maxwell TAU 网格



(c) 等值的计算精度

图 2 R16.0 新 TAU 网格剖分技术优势对比分析

钢的网格完全相同。值得注意的是，尽管磁钢的网格克隆而来，但是仅针对初始网格，如果使用 Maxwell 自适应网格剖分技术迭代网格，则迭代后的 4 个磁钢网格不再是网格克隆关系，且 Maxwell 有限元矩阵运行时所有网格节点均参与计算。



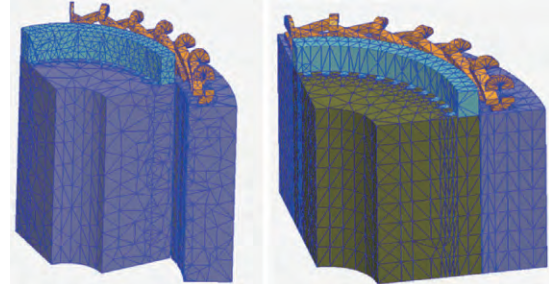
(a) 定义父磁钢 (b) 网格克隆效果

图 3 Maxwell 2D Clone mesh 设置和网格结果

当采用 Maxwell 3D Clone Mesh 技术后，电机模型轴向网格更趋于统一，能大规模降低 3D 模型的网格量，如图 4 所示，Maxwell 3D Clone Mesh 使用前后网格对比图，改善后的网格数量只有传统网格数量的 63%。

3. 计算效率提升

在网格技术改进的同时，Maxwell 求解算法也致力与提升求解效率，不断加强的高性能并行求解技术（ANSYS HPC）为大型三维模型的求解提供了高效运算技术，相对于



(a) 传统 3D 网格 (b) 3D 克隆网格

图 4 Maxwell 3D Clone mesh 结果对比图

单核技术，多核并行求解，可以获得线性加速效果。即使不使用多核并行求解技术，Maxwell 新算法也能显著提升运算效率，表 2 统计了 Maxwell 十年来计算效率提升水平，几乎提升了 60 倍。图 5 为 Maxwell 3D 不同版本改进对比柱状图。

表 2 Maxwell 3D 运算效率提升对比表

版本号	Maxwell 3D V11	Maxwell 3D V14	Maxwell 3D R15	Maxwell 3D R16
发布时间（年）	2006	2011	2014	2015
网格数量(Tets)	240,000	95,000	95,000	50,000
单步求解时间	75 分	13 分	3 分	75 秒
效率提升比（倍）	1	5.7	25	60

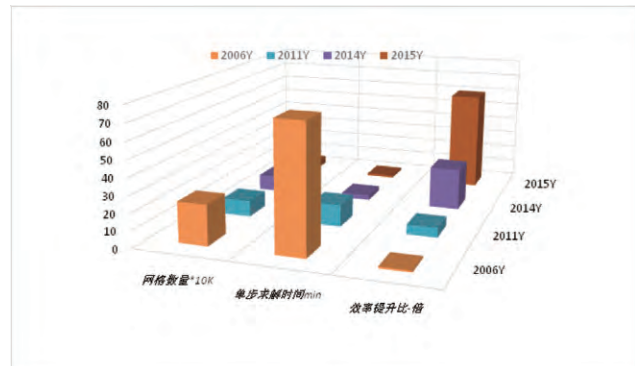


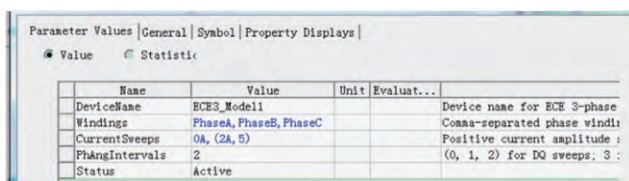
图 5 Maxwell 3D 不同版本改进对比柱状图

三、有限元降阶模型提取

永磁电机调速时需要结合控制电路考虑逆变电流对电机的控制和性能影响，为了将 Maxwell 2D/3D 电磁模型和控制电路模型耦合分析，ANSYS Simplorer 提供了无与伦比的实时耦合—场路协同仿真技术。然而，Maxwell 3D 直接与 Simplorer 实时耦合仿真时，由于时间步长由 Simplorer 控制，计算机实时运算量大，因此为了快速求解场路耦合问题，一般将 Maxwell 2D/3D 有限元模型降阶输出。

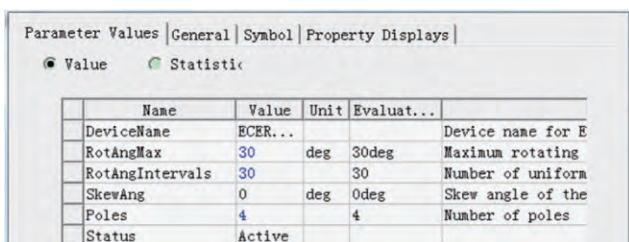
在 R16.0 中, ANSYS Maxwell 开发了具有独特的降阶 ECE 模型输出功能, 直接在瞬态磁场外电路中引入 ECE 控制模块, 通过定义 Maxwell circuit editor 中三相电机的 ECE3_model 和 ECER_model, 快捷抽取电机的 E-Model 模型。

ECE 抽取工作大部分由 Maxwell 软件自动完成, 仅需要分别对 ECE3_model 和 ECER_model 定义参数。如图 6 所示, 其中 Windings 输入电流扫描的绕组, 以逗号相隔; CurrentSweeps 定义电流扫描值和范围, 图示意义为以 0 电流为中间值, 正负各扫描 5 个点, 电流值间隔 2A。图 7 显示了 ECER_model 的定义和使用, 其中 RotAngMax 是最大扫描角度, 对于三相电机而言只需要 60° 电角度, 这里需要填入机械角度; RotAngIntervals 定义角度扫描的点数。在本例中, 角度周期是 30° 、扫描 30 个点; 2 相电流各扫描 11 个点, 所以总的计算点数是 $11 \times 11 \times 30 = 3630$ 点, 即在 Maxwell 瞬态场中会计算 3,630 个时间点, 且不用 DSO 和 OPT License。



Name	Value	Unit	Evaluat...
DeviceName	ECE3_Model1		Device name for ECE 3-phase
Windings	PhaseA, PhaseB, PhaseC		Comma-separated phase windings
CurrentSweeps	0A, (2A, 5)		Positive current amplitude: (0, 1, 2) for DQ sweeps; 3:
PhaseIntervals	2		
Status	Active		

图 6 Maxwell 外电路中的 ECE3_model 模型参数



Name	Value	Unit	Evaluat...
DeviceName	ECER...		Device name for E
RotAngMax	30	deg	30deg Maximum rotating
RotAngIntervals	30		30 Number of uniform
SkewAng	0	deg	0deg Skew angle of the
Poles	4		4 Number of poles
Status	Active		

图 7 Maxwell 外电路中的 ECER_model 模型参数

四、场路耦合协同仿真

求解完成后, 在 Maxwell 对应的 result 结果文件夹下会有一个 ece_model.sml 文件, 可以直接用于 Simplorer 控制电路系统中。本案例永磁电机为图 3 所示电机模型, 在 Maxwell 中定义 $5 \sin(2\pi \cdot 50 \cdot \text{time})$ 电流源激励输入。Simplorer 中构建相同电流源控制电路, 如图 8 所示, 仿真相同电流激励下 Maxwell 直接输出结果, 和 Simplorer 中 ECE 模型输出结果, 验证 ECE 模型计算精度。

图 9 和图 10 分别输出转矩和 C 相反电动势波形对比,

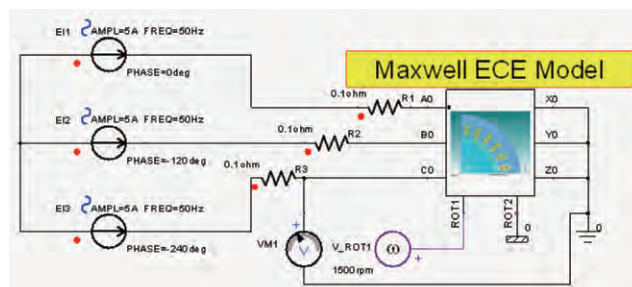


图 8 Simplorer 三相电流源控制电路

实线为 Simplorer 耦合仿真波形, 虚线为 Maxwell 仿真波形导入, 从波形对比可知, 二者吻合度高, 从而验证了 ECE 降阶模型的精确度, 而此状态下 Simplorer 的仿真速度非常快, 数秒时间便已经完成, 仅为 Maxwell 仿真时间的几十分之一, 大大提高了永磁电机仿真分析中场路耦合协同仿真的时效性和可行性, 非常方便研究高保真永磁电机模型下的各种复杂控制电路和控制策略。

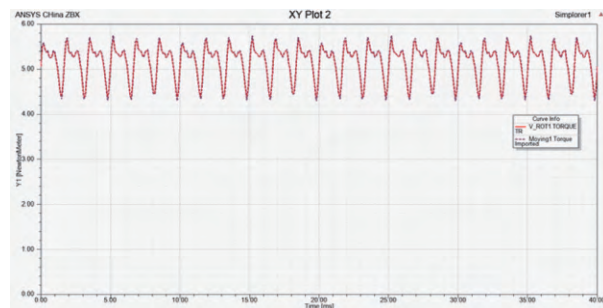


图 9 Simplorer+ECE 模型 vs Maxwell 时域仿真负载转矩波形

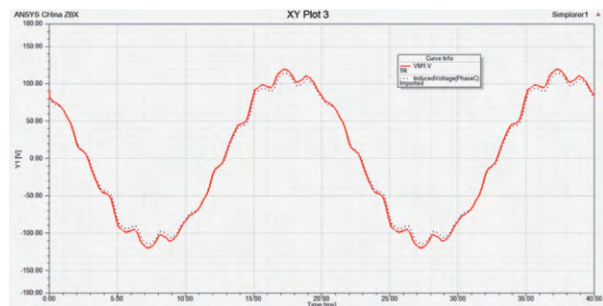


图 10 Simplorer+ECE 模型 vs Maxwell 时域仿真绕组感应电势波形

五、结语

本文基于高速发展的 CAE 工程仿真领域的行业领导企业 ANSYS 有限元电磁场数值计算工具, 阐述了 Maxwell 2015 年 R16 新版本对高性能永磁电动机磁钢涡流损耗计算、与控制电路场协同等研究热点中应用的提升, 帮助用户获得高效仿真分析方法, 提升仿真效率。