

ANSYS®



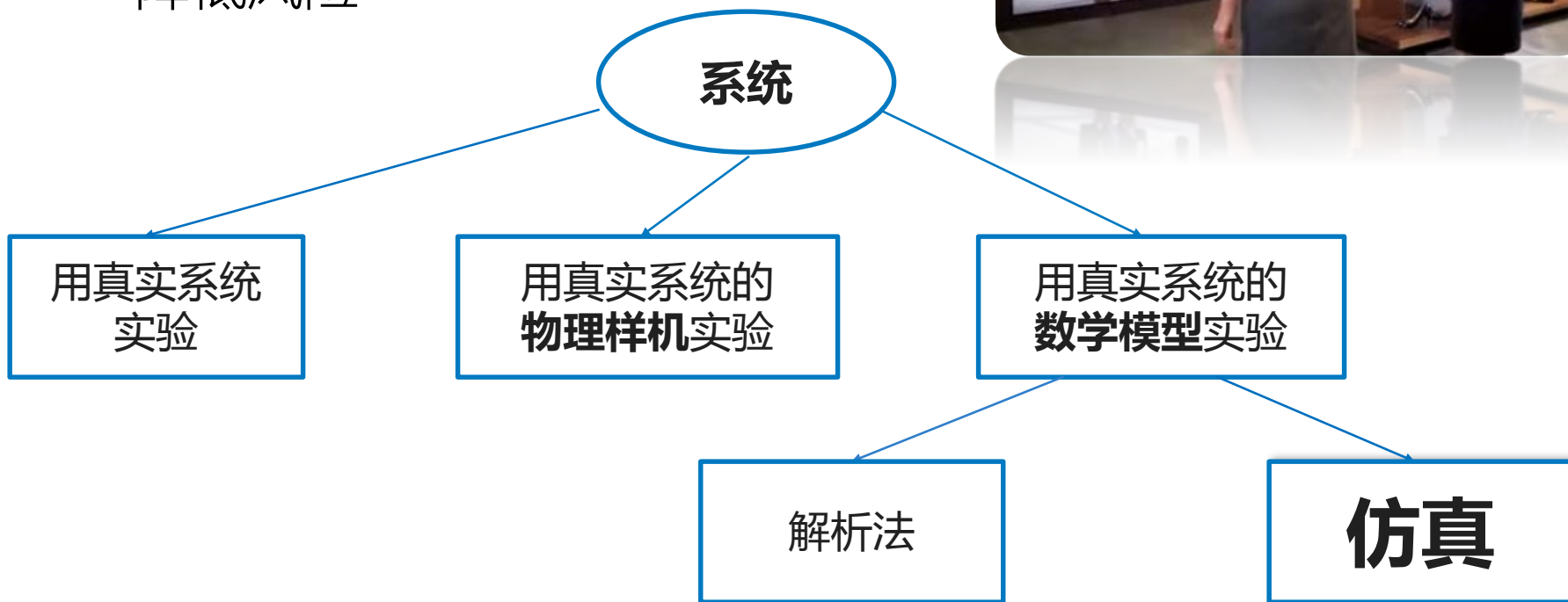
ANSYS中国技术大会
中国·上海

电源设备传导干扰仿真

童辉/高级应用工程师

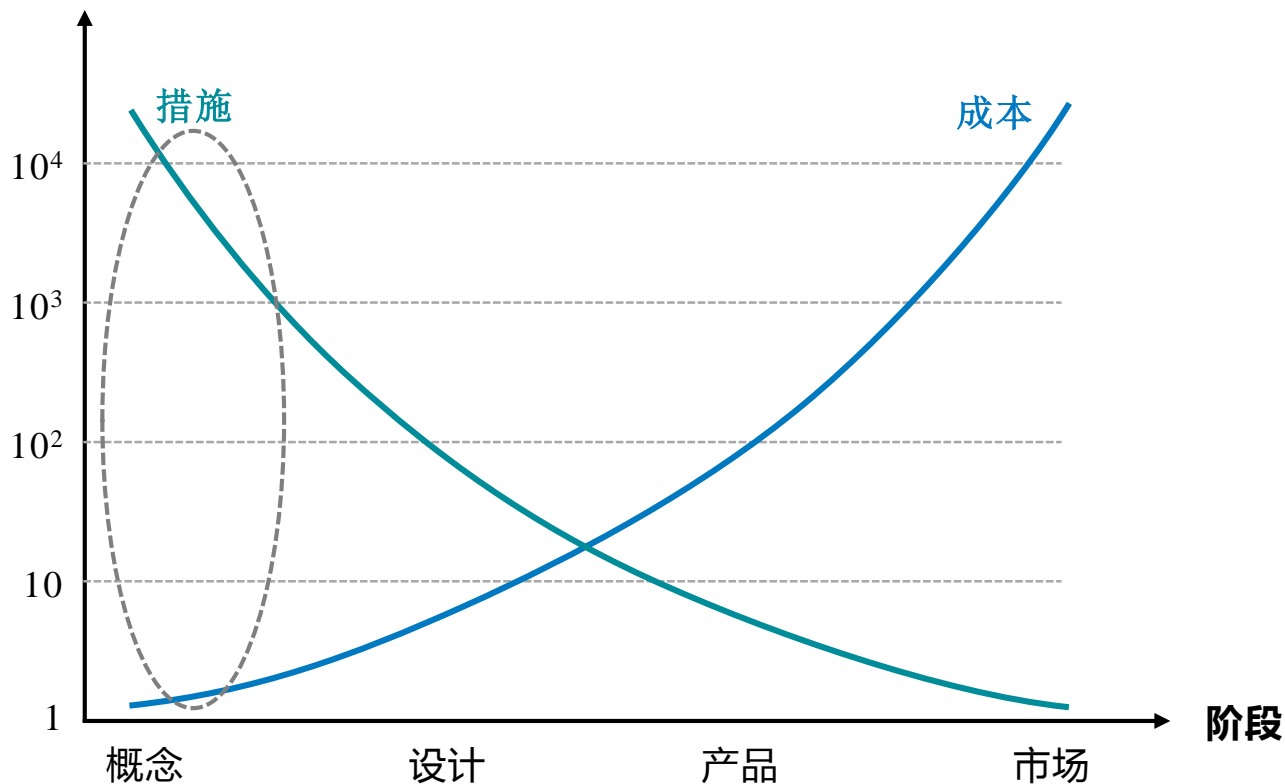
用仿真手段分析系统性能

- 分析/预估性能
- 提升性能
- 降低风险



尽早解决问题十分必要

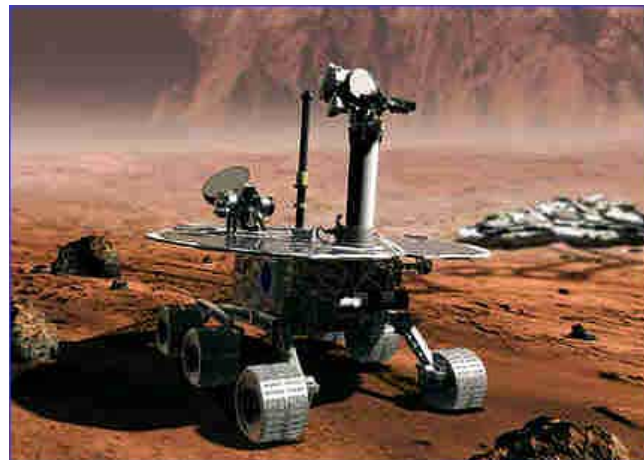
解决设计问题措施、成本与产品的开发过程的关系



- 解决设计问题的成本随着开发过程的呈指数级增长
- 越早发现设计问题，解决方法就越多
- 若后期才发现问题，解决的措施就大大减少，难度也会大很多
- **基于虚拟原型的仿真，是在早期发现设计问题、研究解决措施的最佳手段**

为什么要采用CAE

- 推动创新
- 提升性能
- 节省成本
- 降低风险



NASA火星探测器



波音777



汽车工业



目录

1

电源设备传导干扰分析面临的问题

2

ANSYS电源设备传导干扰分析流程

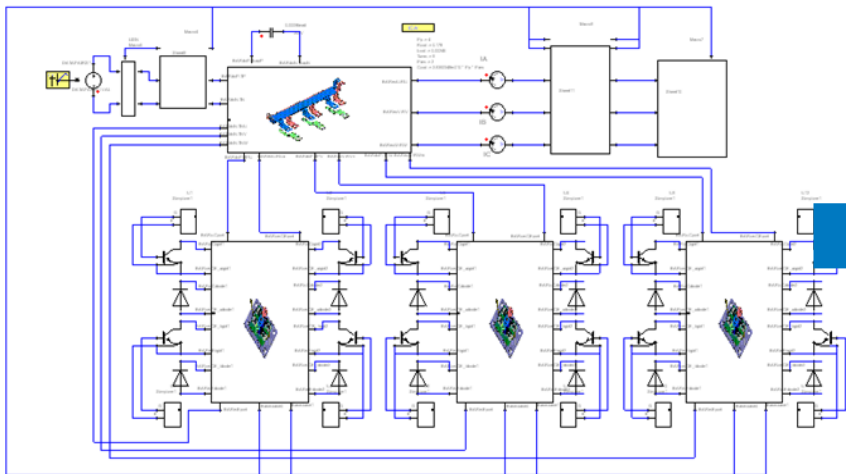
3

ANSYS电源设备传导干扰分析案例

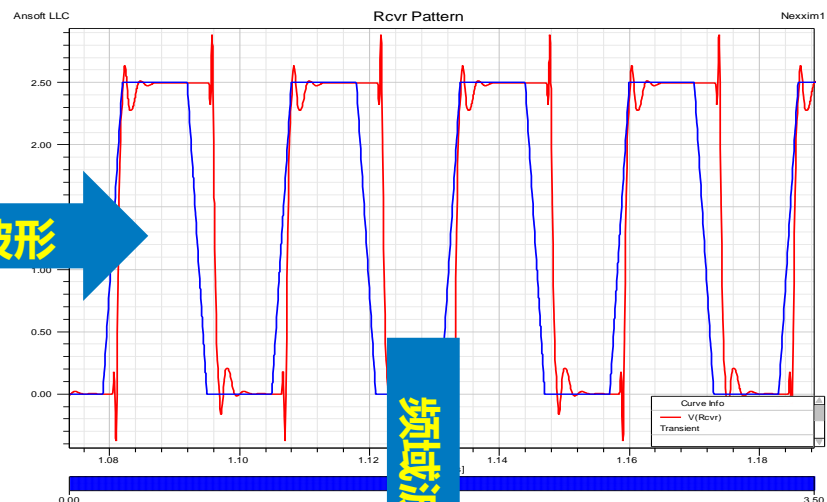
4

交流与讨论

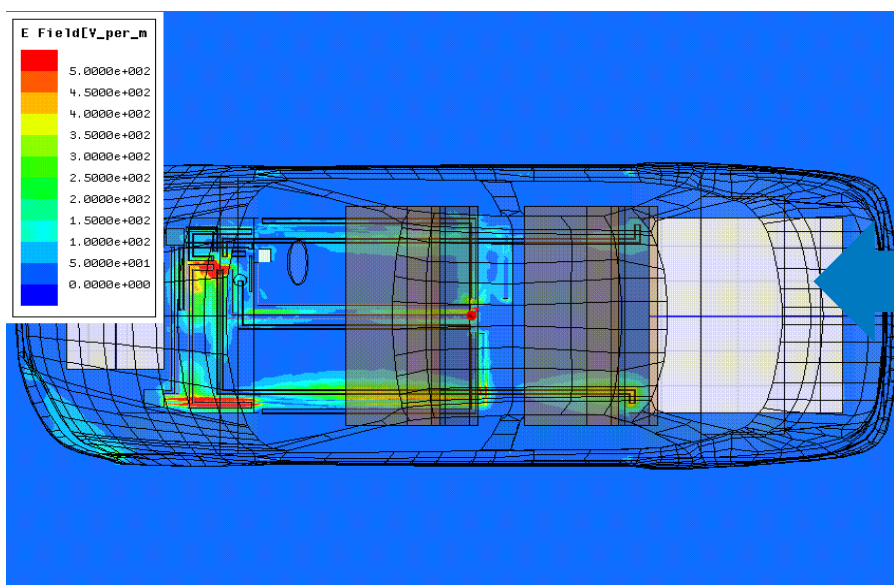
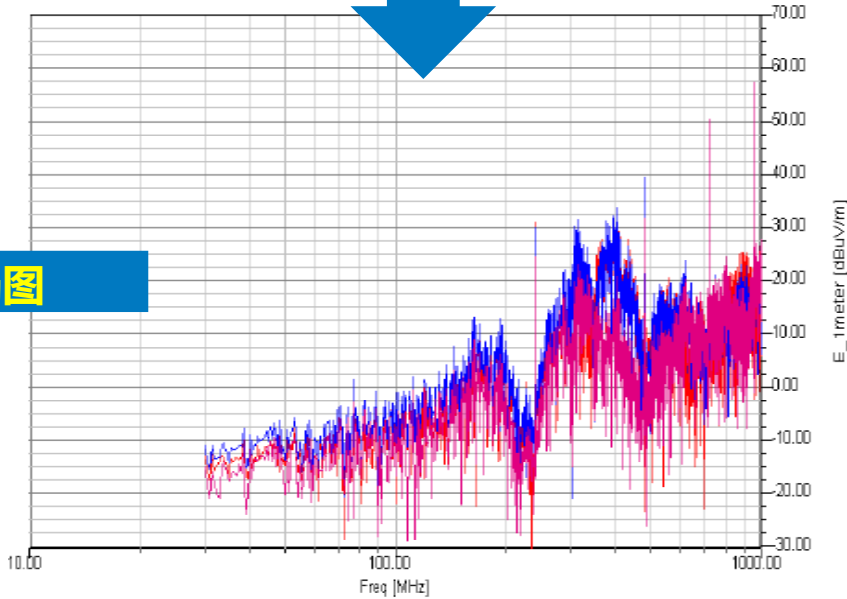
EMC分析流程复杂



时域波形



频域波形

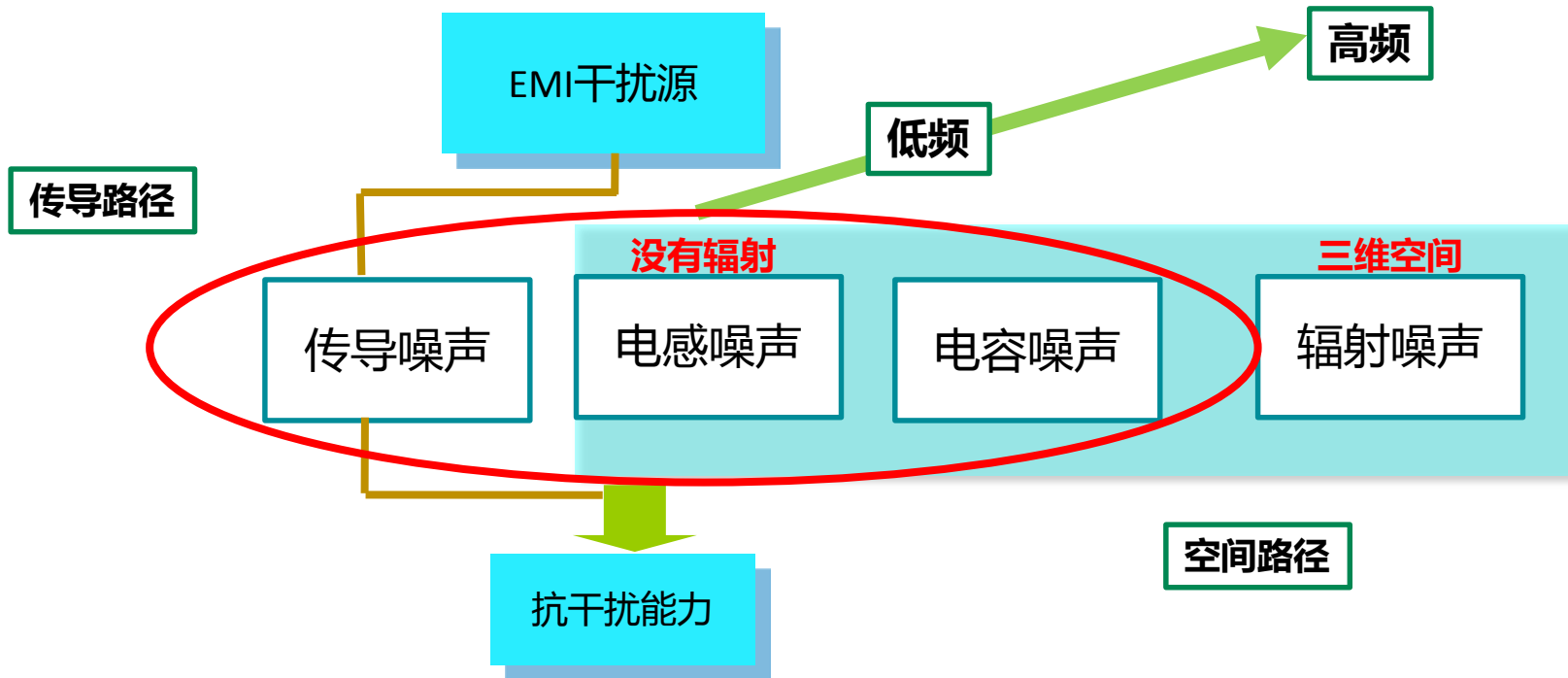


场图

干扰源定位/处理方法繁杂

■ 电磁干扰三要素

- ◆ 干扰源
- ◆ 耦合路径
- ◆ 被干扰体



分析软件众多/难以取舍

电磁分析软件

电路仿真

适用于功率电子、电路、控制系统仿真分析

优势：速度快、适合电路/系统级仿真分析
劣势：缺少物理原型系统仿真与集成能力

电磁场仿真

适用于二维/三维实体模型电磁特性分析

优势：精度高、适合精确计算对象特定电磁特性
劣势：缺少与电路/系统集成仿真分析能力

ANSYS

- **标杆部件建模工具**：具有业界标杆电磁场分析工具，多种算法可保证不同仿真对象的仿真精度；
- **层次建模能力**：具有系统级、电路级与物理原型级模型建模与集成仿真分析能力；
- **协同仿真能力**：电路与电磁场仿真工具可实现协同仿真分析，实现最高级别的仿真分析；
- **完备的设计流程**：依据不同的分析对象和具体问题，可实现多层次分析，具有完备的设计流程。

目录

1

电源设备传导干扰分析面临的问题

2

ANSYS电源设备传导干扰分析流程

3

ANSYS电源设备传导干扰分析案例

4

交流与讨论

EMC仿真层次定位

■ 黑盒子

数据全面性：

- 不具备系统内的主要设备和部件数据；

仿真目的：

- 快速验证结论
- 研究设计规则

■ 灰盒子

数据全面性：

- 具备系统内的部分数据，如关键线缆布局、设备机箱结构；

仿真目的：

- 关键部件的电磁兼容性分析；
- 系统具体电磁兼容性问题的分析与定位；
- 研究设计规则

■ 白盒子

数据全面性：

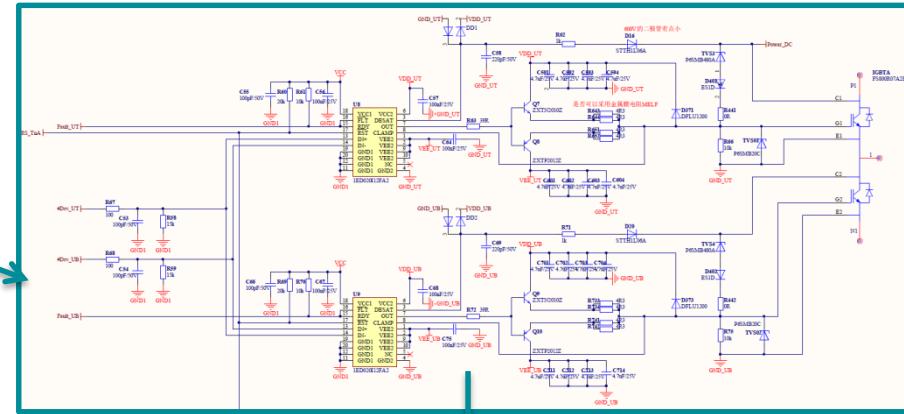
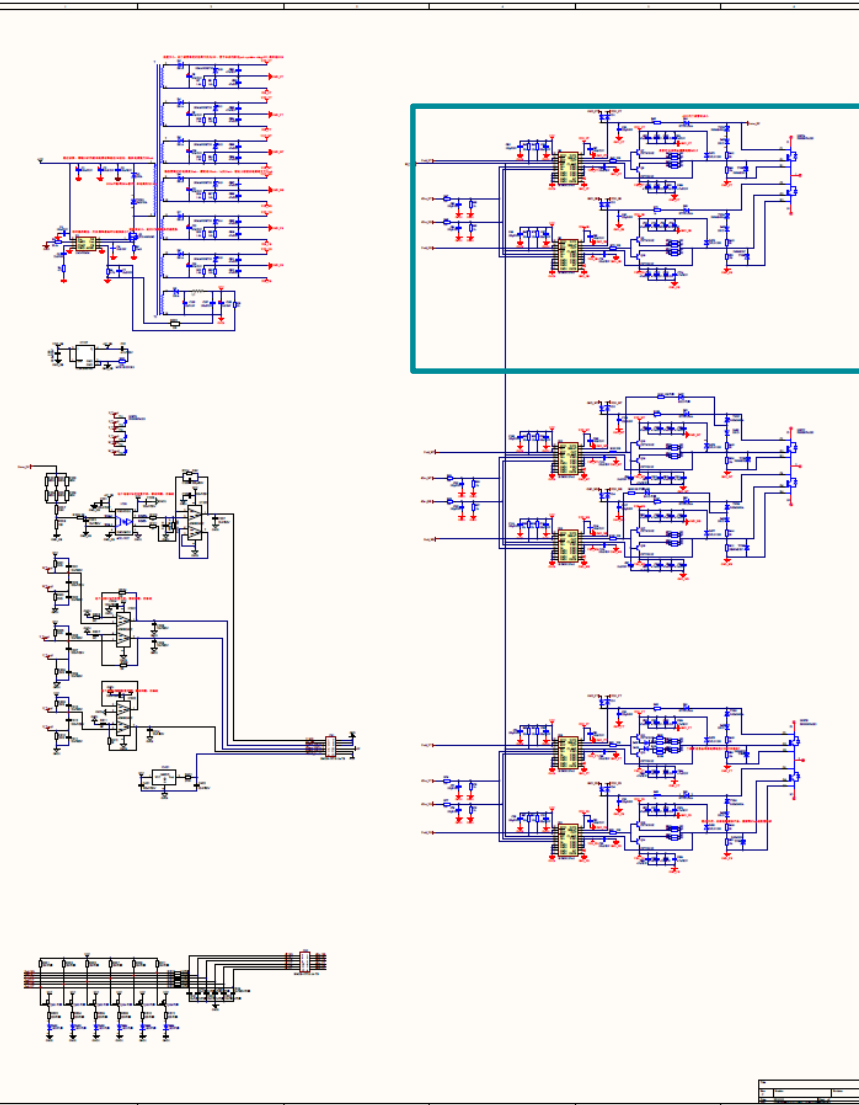
- 具备系统内的所有影响电性能的设备、部件和互连结构的数据；

仿真目的：

- 全面分析和预测系统电磁兼容性；
- 搭建系统电磁兼容性设计流程；
- 研究设计规则

- 针对不同的问题与不同的研究对象需要采用不同的仿真方法。

示例：器件型号多



Comment	Description	Designator	Footprint	LibRef	Quantity	PartNumber	Manufacturer
4 Pin 250V DPM	Diode	SMC011	SMC011	DIODE	1	SMC011	SMC
100nF/25V SMT Cap	Cap	C4	C4	0805CC	1	11111111111111111111	AVX
200nF/50V SMT Cap	Cap	C5	C5	0805CC	1	11111111111111111111	AVX
100nF/50V SMT Cap	Cap	C6	C6	0805CC	1	11111111111111111111	AVX
47uF/35V Rubycon 1.2V	Cap	C7	C7	1206FB	1	11111111111111111111	Rubycon
22uF/16V Rubycon 1.2V	Cap	C8	C8	1206FB	1	11111111111111111111	Rubycon
100nF/50V SMT Cap	Cap	C9	C9	0805CC	1	11111111111111111111	AVX
330pF/50V SMT Cap	Cap	C10	C10	0805CC	1	11111111111111111111	AVX
ESD	Diode	D1	D1	DIODE	1	11111111111111111111	ST
ESD	Diode	D2	D2	DIODE	1	11111111111111111111	ST
ESD	Diode	D3	D3	DIODE	1	11111111111111111111	ST
ESD	Diode	D4	D4	DIODE	1	11111111111111111111	ST
ESD	Diode	D5	D5	DIODE	1	11111111111111111111	ST
ESD	Diode	D6	D6	DIODE	1	11111111111111111111	ST
ESD	Diode	D7	D7	DIODE	1	11111111111111111111	ST
ESD	Diode	D8	D8	DIODE	1	11111111111111111111	ST
ESD	Diode	D9	D9	DIODE	1	11111111111111111111	ST
ESD	Diode	D10	D10	DIODE	1	11111111111111111111	ST
ESD	Diode	D11	D11	DIODE	1	11111111111111111111	ST
ESD	Diode	D12	D12	DIODE	1	11111111111111111111	ST
ESD	Diode	D13	D13	DIODE	1	11111111111111111111	ST
ESD	Diode	D14	D14	DIODE	1	11111111111111111111	ST
ESD	Diode	D15	D15	DIODE	1	11111111111111111111	ST
ESD	Diode	D16	D16	DIODE	1	11111111111111111111	ST
ESD	Diode	D17	D17	DIODE	1	11111111111111111111	ST
ESD	Diode	D18	D18	DIODE	1	11111111111111111111	ST
ESD	Diode	D19	D19	DIODE	1	11111111111111111111	ST
ESD	Diode	D20	D20	DIODE	1	11111111111111111111	ST
ESD	Diode	D21	D21	DIODE	1	11111111111111111111	ST
ESD	Diode	D22	D22	DIODE	1	11111111111111111111	ST
ESD	Diode	D23	D23	DIODE	1	11111111111111111111	ST
ESD	Diode	D24	D24	DIODE	1	11111111111111111111	ST
ESD	Diode	D25	D25	DIODE	1	11111111111111111111	ST
ESD	Diode	D26	D26	DIODE	1	11111111111111111111	ST
ESD	Diode	D27	D27	DIODE	1	11111111111111111111	ST
ESD	Diode	D28	D28	DIODE	1	11111111111111111111	ST
ESD	Diode	D29	D29	DIODE	1	11111111111111111111	ST
ESD	Diode	D30	D30	DIODE	1	11111111111111111111	ST
ESD	Diode	D31	D31	DIODE	1	11111111111111111111	ST
ESD	Diode	D32	D32	DIODE	1	11111111111111111111	ST
ESD	Diode	D33	D33	DIODE	1	11111111111111111111	ST
ESD	Diode	D34	D34	DIODE	1	11111111111111111111	ST
ESD	Diode	D35	D35	DIODE	1	11111111111111111111	ST
ESD	Diode	D36	D36	DIODE	1	11111111111111111111	ST
ESD	Diode	D37	D37	DIODE	1	11111111111111111111	ST
ESD	Diode	D38	D38	DIODE	1	11111111111111111111	ST
ESD	Diode	D39	D39	DIODE	1	11111111111111111111	ST
ESD	Diode	D40	D40	DIODE	1	11111111111111111111	ST
ESD	Diode	D41	D41	DIODE	1	11111111111111111111	ST
ESD	Diode	D42	D42	DIODE	1	11111111111111111111	ST
ESD	Diode	D43	D43	DIODE	1	11111111111111111111	ST
ESD	Diode	D44	D44	DIODE	1	11111111111111111111	ST
ESD	Diode	D45	D45	DIODE	1	11111111111111111111	ST
ESD	Diode	D46	D46	DIODE	1	11111111111111111111	ST
ESD	Diode	D47	D47	DIODE	1	11111111111111111111	ST
ESD	Diode	D48	D48	DIODE	1	11111111111111111111	ST
ESD	Diode	D49	D49	DIODE	1	11111111111111111111	ST
ESD	Diode	D50	D50	DIODE	1	11111111111111111111	ST
ESD	Diode	D51	D51	DIODE	1	11111111111111111111	ST
ESD	Diode	D52	D52	DIODE	1	11111111111111111111	ST
ESD	Diode	D53	D53	DIODE	1	11111111111111111111	ST
ESD	Diode	D54	D54	DIODE	1	11111111111111111111	ST
ESD	Diode	D55	D55	DIODE	1	11111111111111111111	ST
ESD	Diode	D56	D56	DIODE	1	11111111111111111111	ST
ESD	Diode	D57	D57	DIODE	1	11111111111111111111	ST
ESD	Diode	D58	D58	DIODE	1	11111111111111111111	ST
ESD	Diode	D59	D59	DIODE	1	11111111111111111111	ST
ESD	Diode	D60	D60	DIODE	1	11111111111111111111	ST
ESD	Diode	D61	D61	DIODE	1	11111111111111111111	ST
ESD	Diode	D62	D62	DIODE	1	11111111111111111111	ST
ESD	Diode	D63	D63	DIODE	1	11111111111111111111	ST
ESD	Diode	D64	D64	DIODE	1	11111111111111111111	ST
ESD	Diode	D65	D65	DIODE	1	11111111111111111111	ST
ESD	Diode	D66	D66	DIODE	1	11111111111111111111	ST
ESD	Diode	D67	D67	DIODE	1	11111111111111111111	ST
ESD	Diode	D68	D68	DIODE	1	11111111111111111111	ST
ESD	Diode	D69	D69	DIODE	1	11111111111111111111	ST
ESD	Diode	D70	D70	DIODE	1	11111111111111111111	ST
ESD	Diode	D71	D71	DIODE	1	11111111111111111111	ST
ESD	Diode	D72	D72	DIODE	1	11111111111111111111	ST
ESD	Diode	D73	D73	DIODE	1	11111111111111111111	ST
ESD	Diode	D74	D74	DIODE	1	11111111111111111111	ST
ESD	Diode	D75	D75	DIODE	1	11111111111111111111	ST
ESD	Diode	D76	D76	DIODE	1	11111111111111111111	ST
ESD	Diode	D77	D77	DIODE	1	11111111111111111111	ST
ESD	Diode	D78	D78	DIODE	1	11111111111111111111	ST
ESD	Diode	D79	D79	DIODE	1	11111111111111111111	ST
ESD	Diode	D80	D80	DIODE	1	11111111111111111111	ST
ESD	Diode	D81	D81	DIODE	1	11111111111111111111	ST
ESD	Diode	D82	D82	DIODE	1	11111111111111111111	ST
ESD	Diode	D83	D83	DIODE	1	11111111111111111111	ST
ESD	Diode	D84	D84	DIODE	1	11111111111111111111	ST
ESD	Diode	D85	D85	DIODE	1	11111111111111111111	ST
ESD	Diode	D86	D86	DIODE	1	11111111111111111111	ST
ESD	Diode	D87	D87	DIODE	1	11111111111111111111	ST
ESD	Diode	D88	D88	DIODE	1	11111111111111111111	ST
ESD	Diode	D89	D89	DIODE	1	11111111111111111111	ST
ESD	Diode	D90	D90	DIODE	1	11111111111111111111	ST
ESD	Diode	D91	D91	DIODE	1	11111111111111111111	ST
ESD	Diode	D92	D92	DIODE	1	11111111111111111111	ST
ESD	Diode	D93	D93	DIODE	1	11111111111111111111	ST
ESD	Diode	D94	D94	DIODE	1	11111111111111111111	ST
ESD	Diode	D95	D95	DIODE	1	11111111111111111111	ST
ESD	Diode	D96	D96	DIODE	1	11111111111111111111	ST
ESD	Diode	D97	D97	DIODE	1	11111111111111111111	ST
ESD	Diode	D98	D98	DIODE	1	11111111111111111111	ST
ESD	Diode	D99	D99	DIODE	1	11111111111111111111	ST
ESD	Diode	D100	D100	DIODE	1	11111111111111111111	ST

15家公司、54种有源/无源器件！

示例：器件精度差异影响仿真结果

```
.SUBCKT irf520n 1 2 3
*****
* Model Generated by MODPEX *
*Copyright(c) Symmetry Design Systems*
* All Rights Reserved *
* UNPUBLISHED LICENSED SOFTWARE *
* Contains Proprietary Information *
* Which is The Property of *
* SYMMETRY OR ITS LICENSORS *
*Commercial Use or Resale Restricted *
* by Symmetry License Agreement *
*****
* Model generated on Apr 24, 96
* Model format: SPICE3
* Symmetry POWER MOS Model (Version 1.0)
* External Node Designations
* Node 1 -> Drain
* Node 2 -> Gate
* Node 3 -> Source
M1 9 7 8 MM L=100u W=100u
* Default values used in MM:
* The voltage-dependent capacitances are
* not included. Other default values are:
* RS=0 RD=0 LD=0 CBD=0 CBS=0 CGBO=0
.MODEL MM NMOS LEVEL=1 IS=1e-32
+VTO=2.79085 LAMBDA=0 KP=1.5946
+CGSO=2.79023e-06 CGDO=1e-11
RS 8 3 0.00043957
D1 3 1 MD
.MODEL MD D IS=8.70123e-12 RS=0.0112359 N=1.18415 BV=100
+IBV=0.00025 EG=1.2 XTI=4 TT=1e-07
+CJO=1.90917e-10 VJ=0.5 M=0.395048 FC=0.1
RDS 3 1 4e+06
RD 9 1 0.0981901
RG 2 7 2.49106
D2 4 5 MD1
* Default values used in MD1:
* RS=0 EG=1.11 XTI=3.0 TT=0
* BV=infinite IBV=1mA
.MODEL MD1 D IS=1e-32 N=50
+CJO=4.11936e-10 VJ=0.5 M=0.519039 FC=1e-08
D3 0 5 MD2
* Default values used in MD2:
* EG=1.11 XTI=3.0 TT=0 CJO=0
* BV=infinite IBV=1mA
.MODEL MD2 D IS=1e-10 N=0.45888 RS=3e-06
RL 5 10 1
FI2 7 9 VFI2 -1
VFI2 4 0 0
EV16 10 0 9 7 1
CAP 11 10 9.81932e-10
FI1 7 9 VFI1 -1
VFI1 11 6 0
RCAP 6 10 1
D4 0 6 MD3
* Default values used in MD3:
* EG=1.11 XTI=3.0 TT=0 CJO=0
* RS=0 BV=infinite IBV=1mA
.MODEL MD3 D IS=1e-10 N=0.45888
.ENDS
```

Spice

```
----- VHDLAMS MODEL my_batt -----
LIBRARY ieee;
USE ieee.electrical_systems.ALL;

----- ENTITY DECLARATION my_batt -----
ENTITY my_batt IS
    GENERIC (
        factor : real := 1.0;
        v_init : voltage := 12.0
    );
    PORT (
        TERMINAL p : electrical;
        TERMINAL m : electrical;
        QUANTITY v_out : OUT voltage := 0.0
    );
END ENTITY my_batt;

----- ARCHITECTURE DECLARATION behav -----
ARCHITECTURE behav OF my_batt IS

    TERMINAL t1, t2: ELECTRICAL;
    QUANTITY v_ri ACROSS i_ri THROUGH p TO t1;
    QUANTITY v_fc ACROSS i_fc THROUGH t1 TO m;
    QUANTITY v_rd ACROSS i_rd THROUGH t1 TO t2;
    QUANTITY v_sc ACROSS i_sc THROUGH t2 TO m;
    QUANTITY v ACROSS p TO m;
    CONSTANT ri: RESISTANCE := 1.0e-2;
    CONSTANT fc: CAPACITANCE := 60.0;
    CONSTANT rd: RESISTANCE := 4.0e-2;
    CONSTANT sc: CAPACITANCE := 2.0e4;

BEGIN

    BREAK v_fc => v_init, v_sc => v_init;

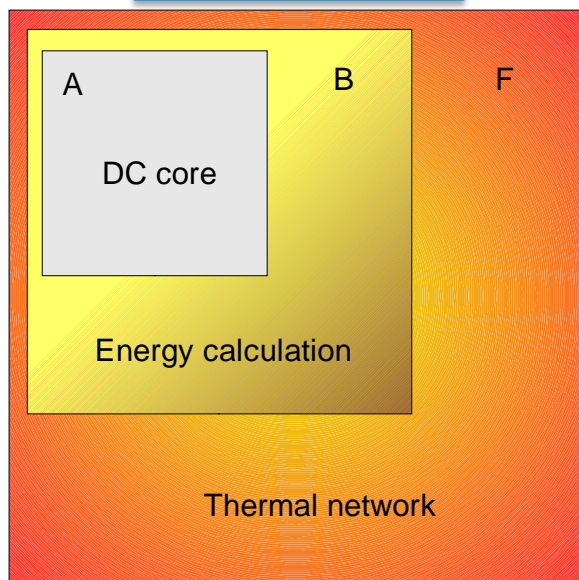
    v_ri == i_ri * ri;
    v_fc' dot == 1.0/(fc*factor) * i_fc;
    v_rd == i_rd * rd;
    v_sc' dot == 1.0/(sc*factor) * i_sc;
    v_out == v;

END ARCHITECTURE behav;
```

VHDL

示例：不同精度器件适合仿真领域不同

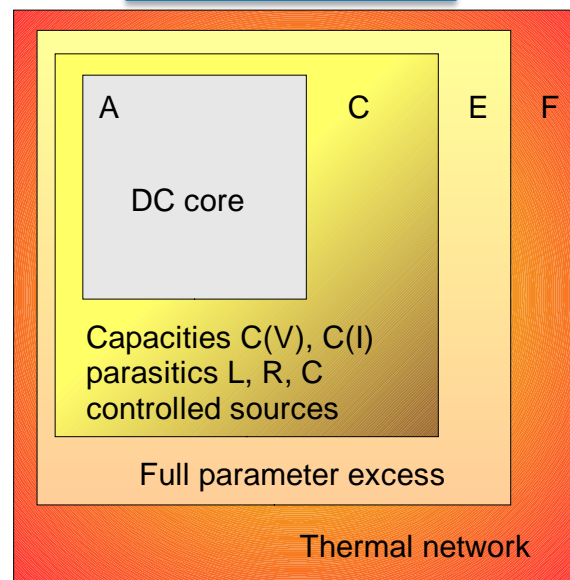
静态特性模型



最快的仿真速度

- 精确的静态特性
- 精确的静态热网络模型
- 电压与电流的瞬态特性不考虑
- 适合系统级的仿真分析

动态特性模型

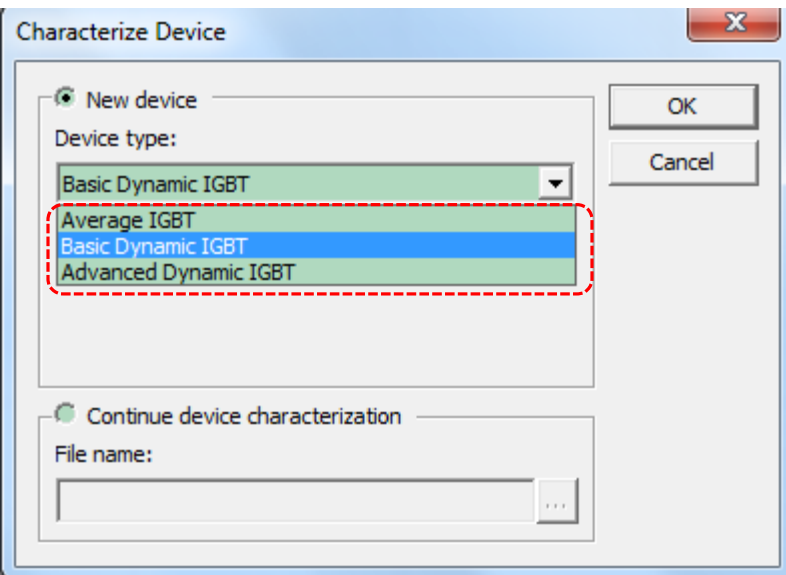
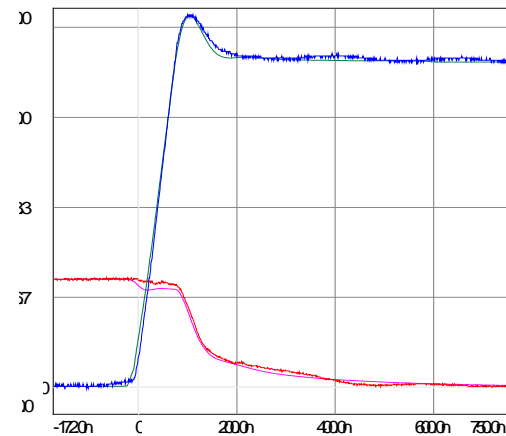
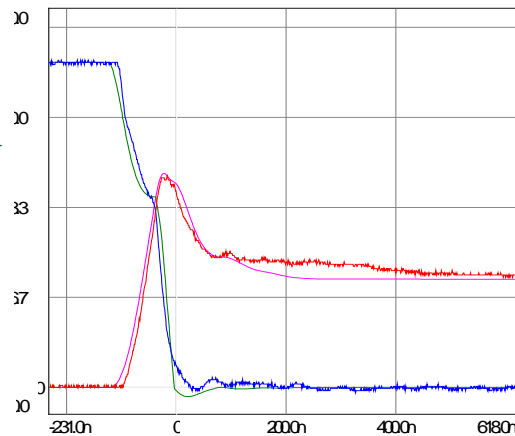


最高的仿真精度:

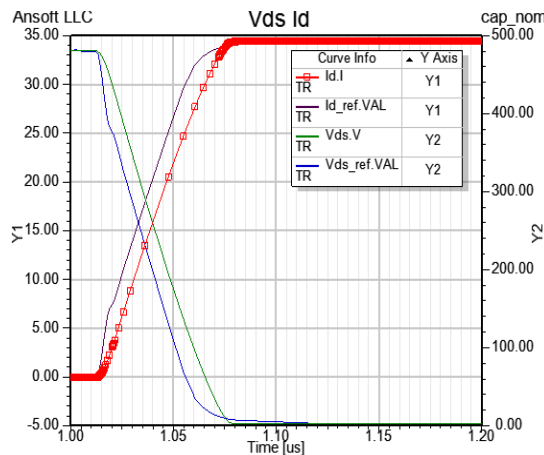
- 最高精度级别的器件级模型
- 精确的静态、动态与热特性
- 精确的电压与电流瞬态特性波形
- 适合驱动系统按树分析，EMI/EMC分析

示例：不同精度模型仿真结果差异

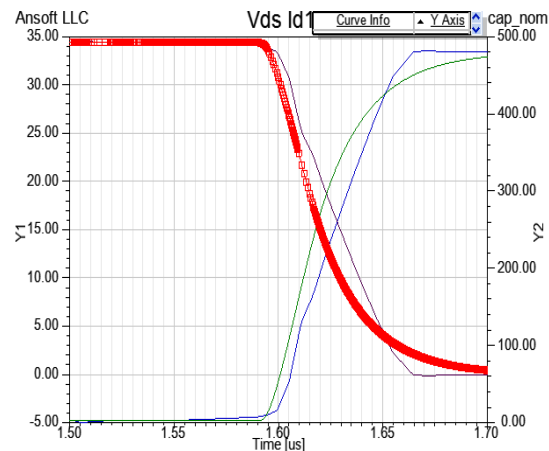
高级动态模型



基本动态模型

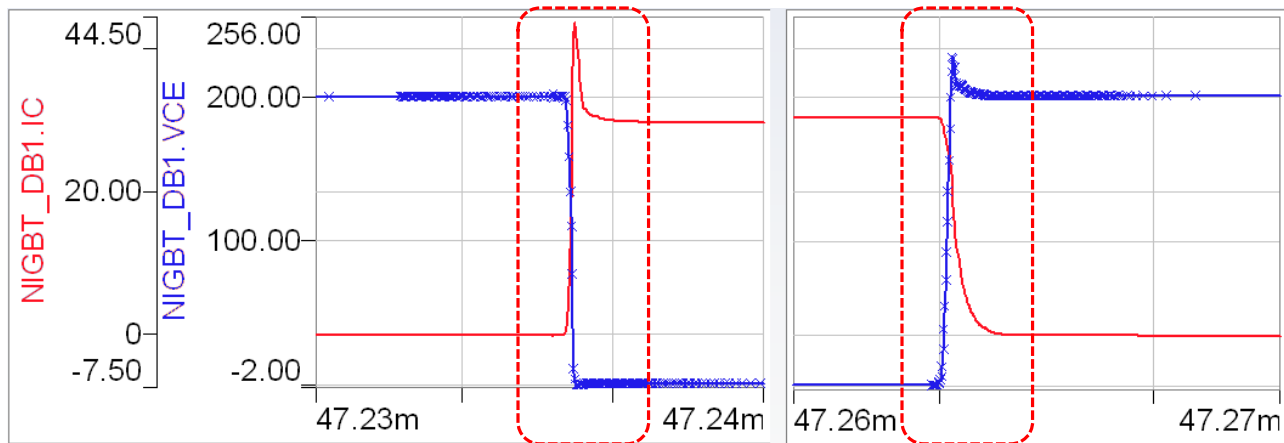
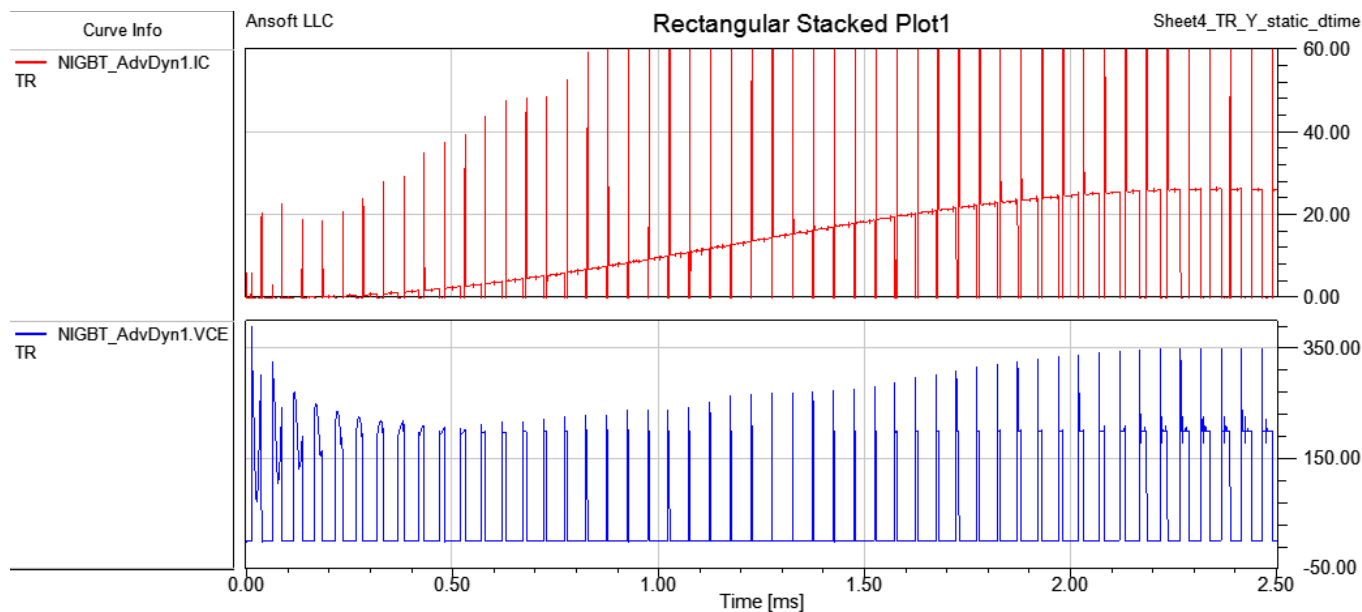


开通



关断

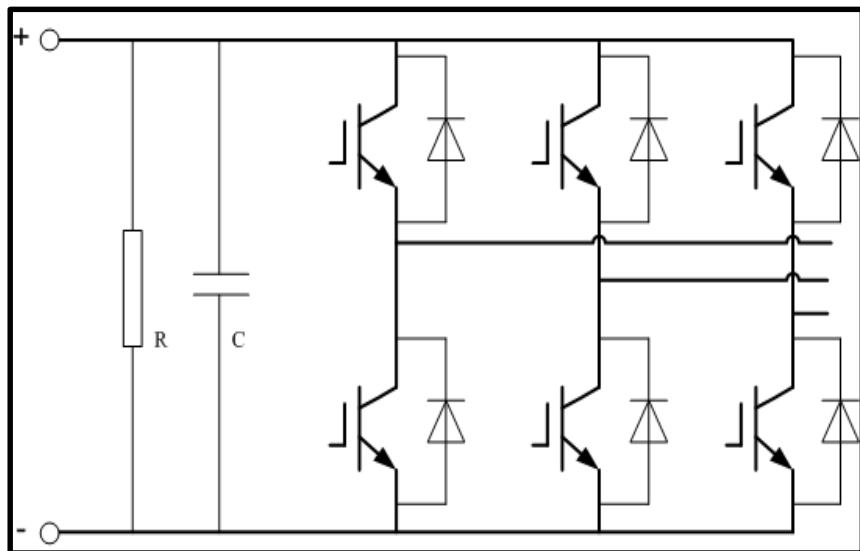
示例结论：器件精度影响EMC仿真



高级动态模型+封装寄生参数提取：开通/关断特性

做减法

精简后的电气结构框图



驱动单元（驱动信号功率放大，传感器信号采集及隔离输出，故障信号隔离输出）



控制单元单元（控制逻辑和算法）

- 关键器件IGBT采用物理原型模型；
- 添加Lisn网络（CISPR 25标准）；
- 添加Prius IPM有限元模型；
- 提取电源母线与电机线缆寄生参数；
- 提取IGBT母排寄生参数； **精度**

- 二极管/三极管/运放等采用基本模型；
- 控制算法和逻辑通过状态机搭建；
- 驱动信号由三角波与正弦波比较得到；
- 简化机箱仿真分析模型。 **速度**

目的：精度与速度得到平衡！

从部件设计开始抑制干扰

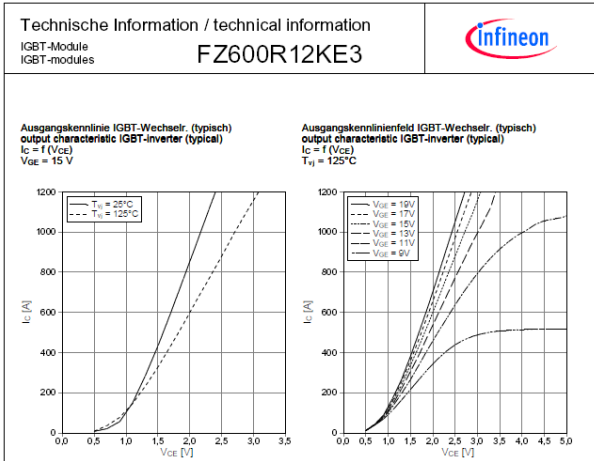
开关器件物理原型建模

■ 专业IGBT开关器件物理原型建模工具，可生成物理原型级IGBT模型

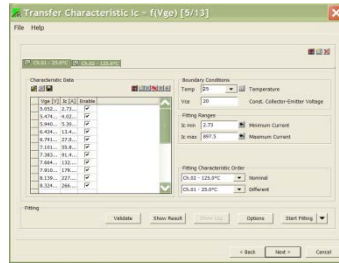


Typical Appearance

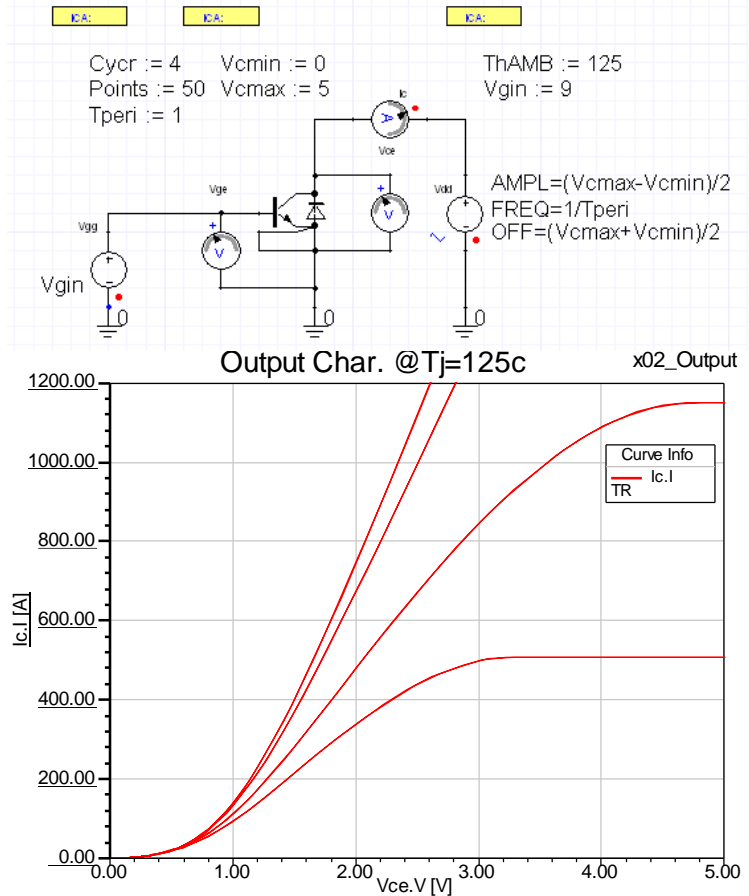
Infineon : FZ600R12KE3



数据手册

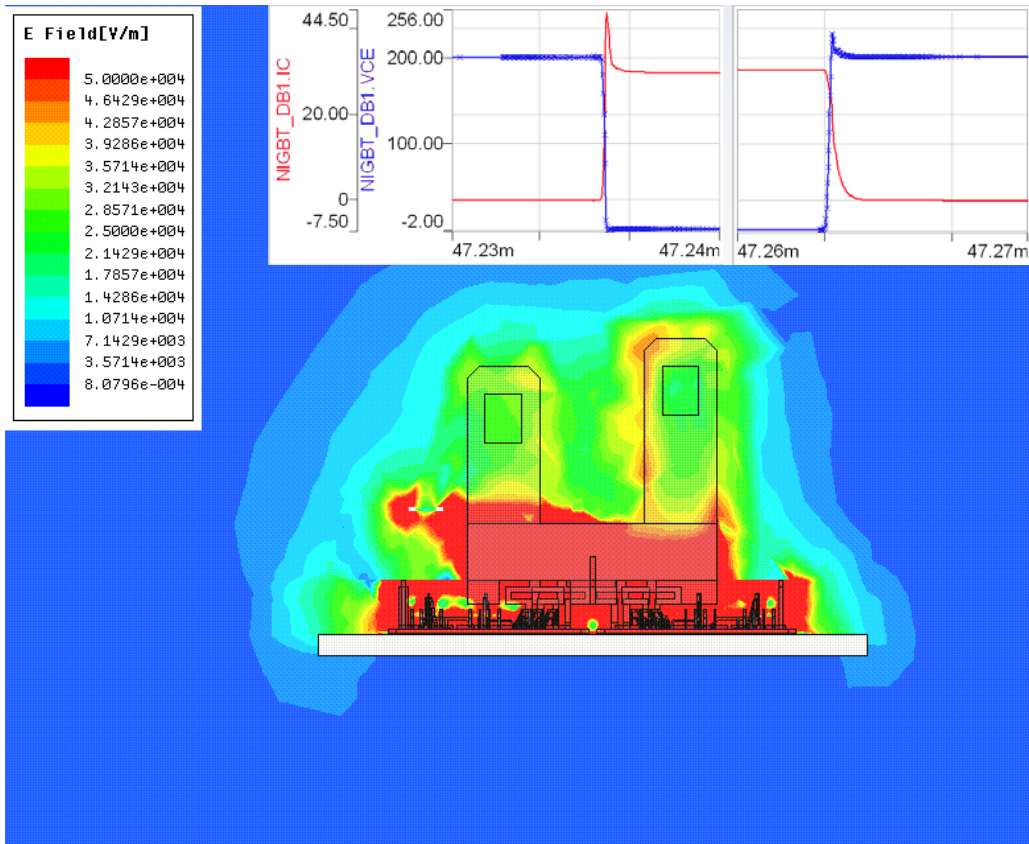


参数提取工具



输出特性曲线Vce-Ic

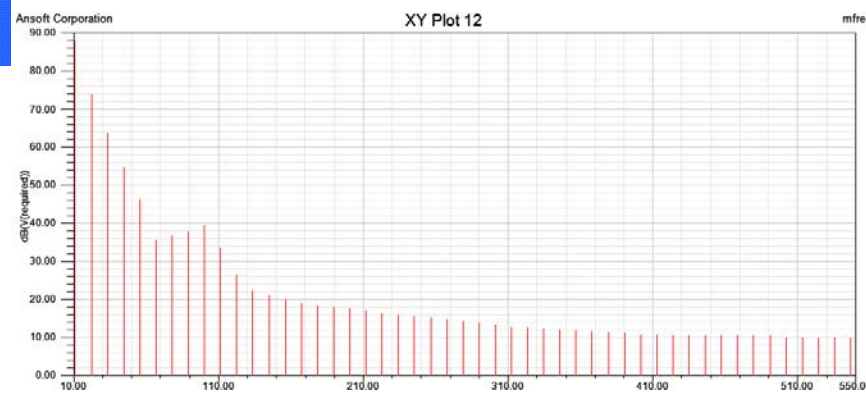
示例：开关器件开关过程电磁辐射



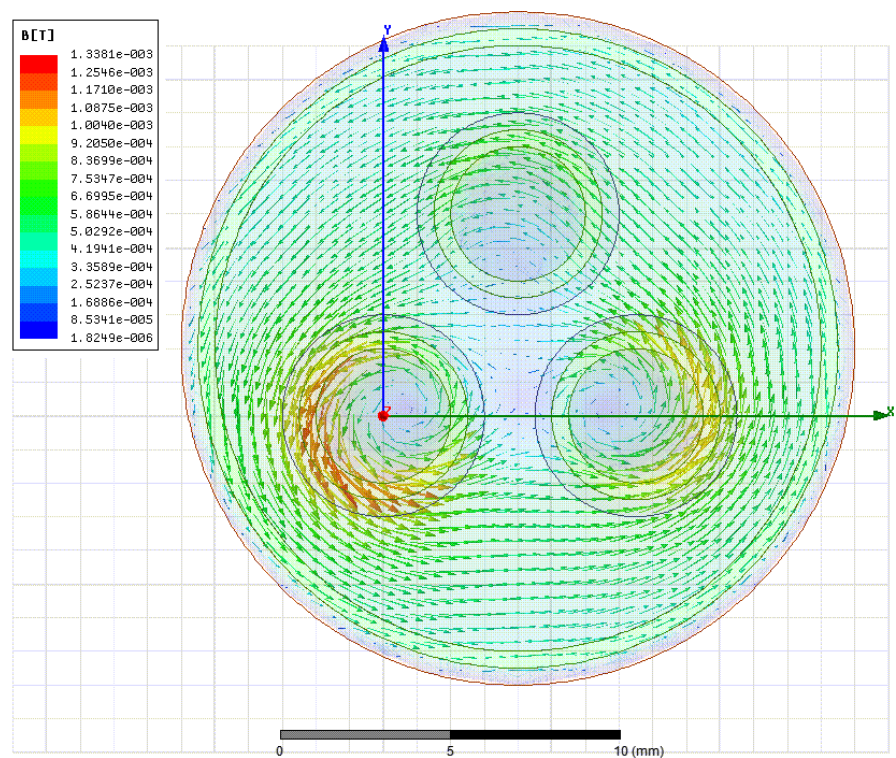
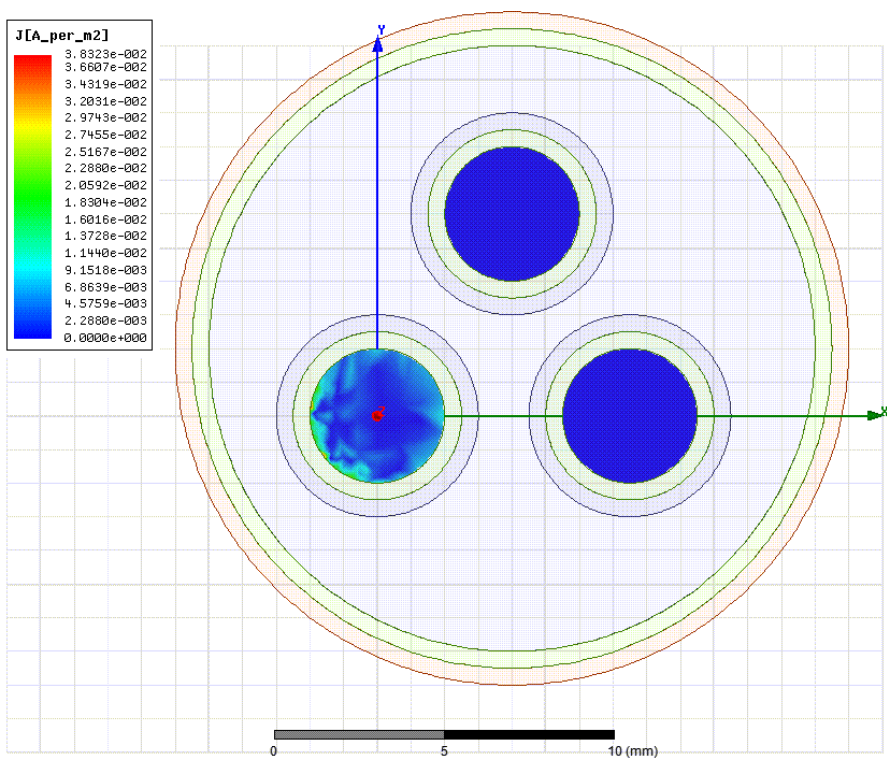
- 即使器件工作在100MHz，电场也主要分布在器件周围。
- 器件功率较高，由此造成了距离器件很远的地方电场强度依然很高。
- 经过优化设计和分析，当前模型在110MHz工况下，工作情况良好。

Spectrum (MHz)	Power (W)	E field at 1m (V/m)
115.7024793	2308.359536	10.35553171

电场强度在100MHz

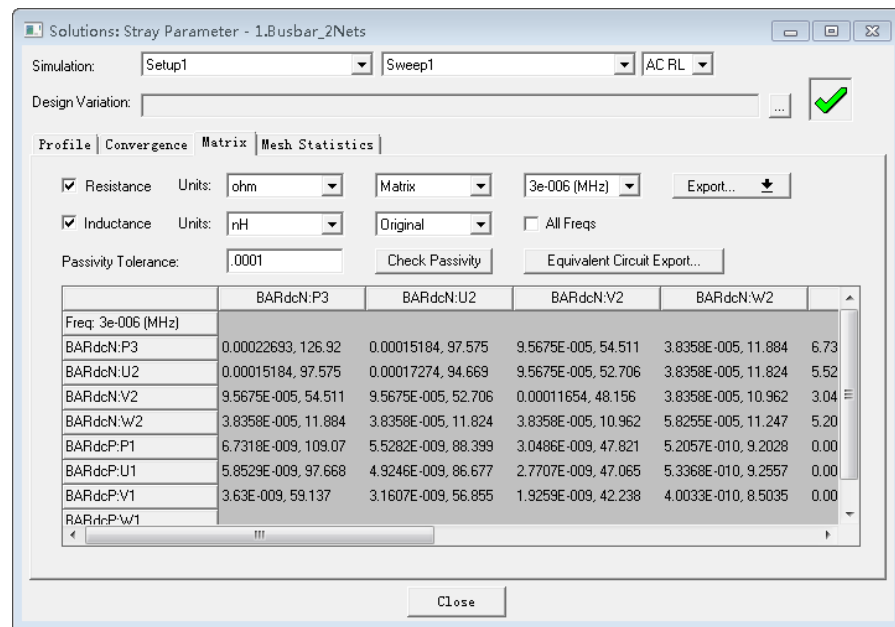
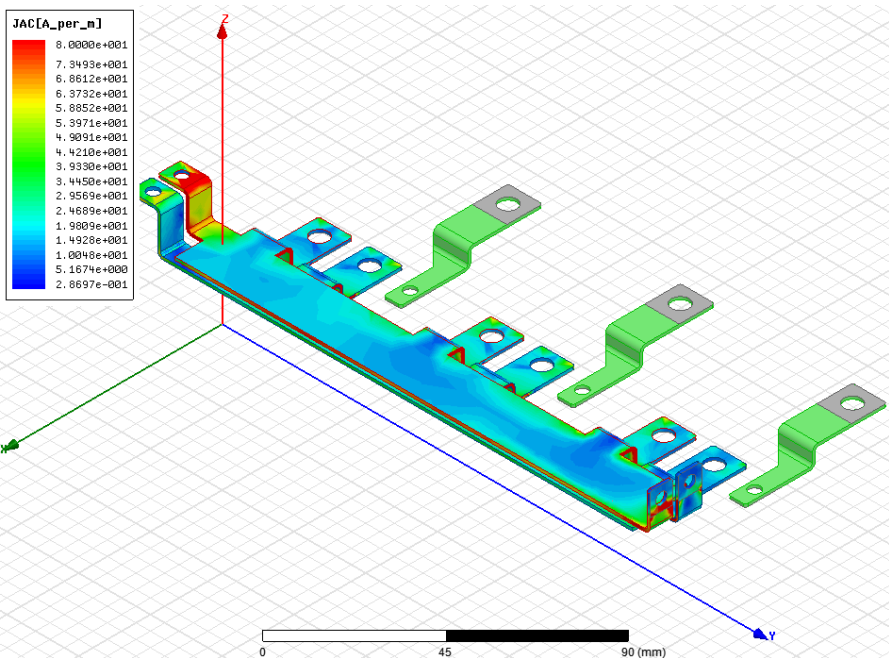


线缆寄生参数提取



- 线缆电流密度等由于“集肤效应”与“邻近效应”的影响分布明显不均匀；
- 通过Q3D可提取模型在不同频率下的RL/CG矩阵，替换掉理想线缆模型。

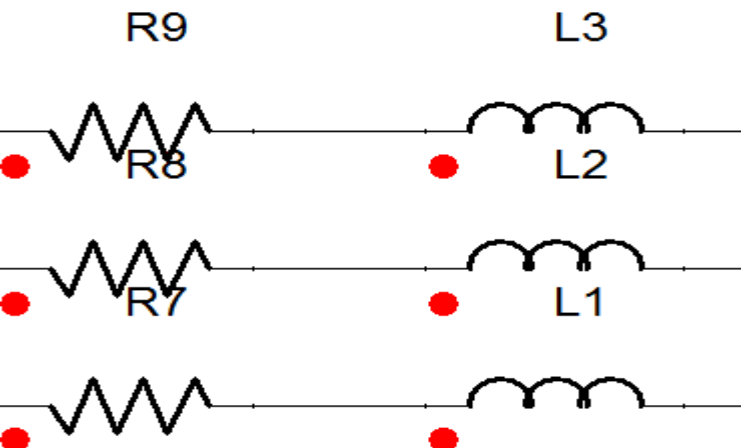
母排寄生参数提取



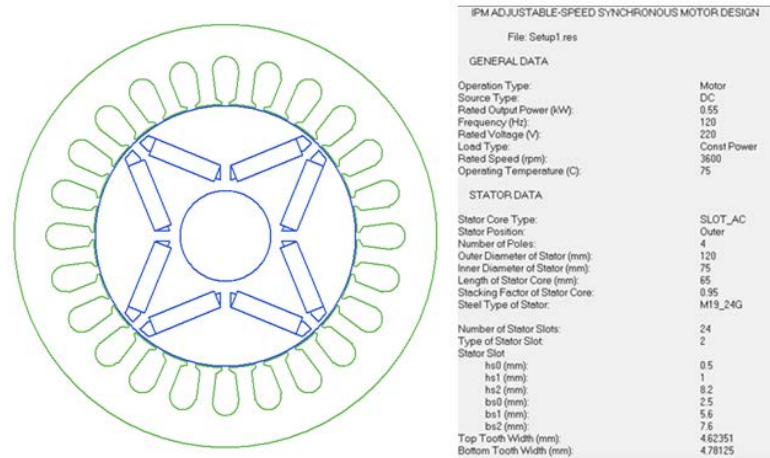
- 母排表面电流由于“集肤效应”与“邻近效应”的影响，明显分布不均匀；
- 通过Q3D可提取模型在不同频率下的RL/CG矩阵，替换掉理想模型的走线。

执行机构物理原型建模

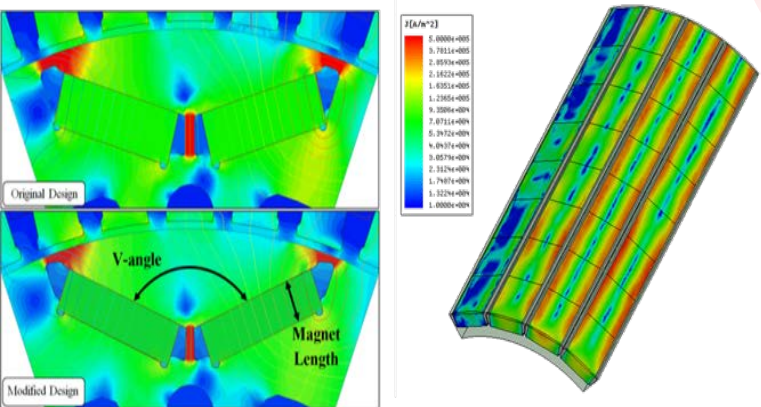
理想电路模型



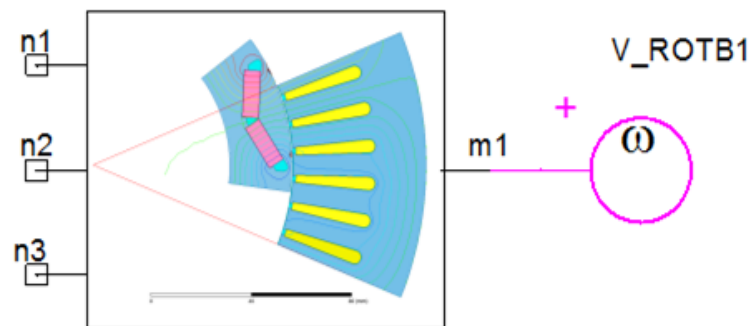
磁路法模型



精度提升



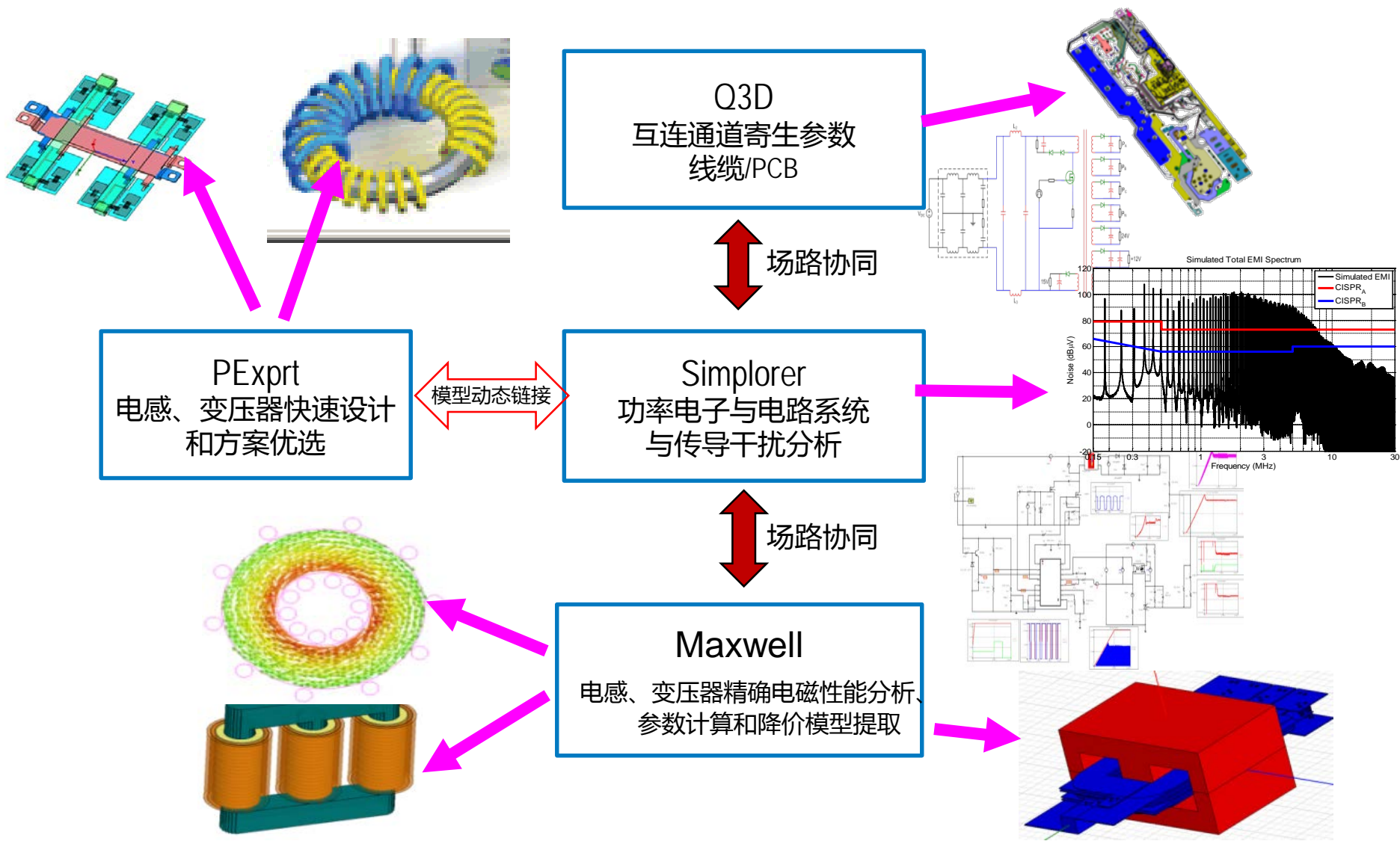
有限元仿真分析模型



SimulatorModel=PMSM_DQ_GNurbs

ECE模型

传导仿真分析流程



在设计流程早期引入传导干扰分析

目录

1

电源设备传导干扰分析面临的问题

2

ANSYS电源设备传导干扰分析流程

3

ANSYS电源设备传导干扰分析案例

4

交流与讨论

反激式开关电源

电池



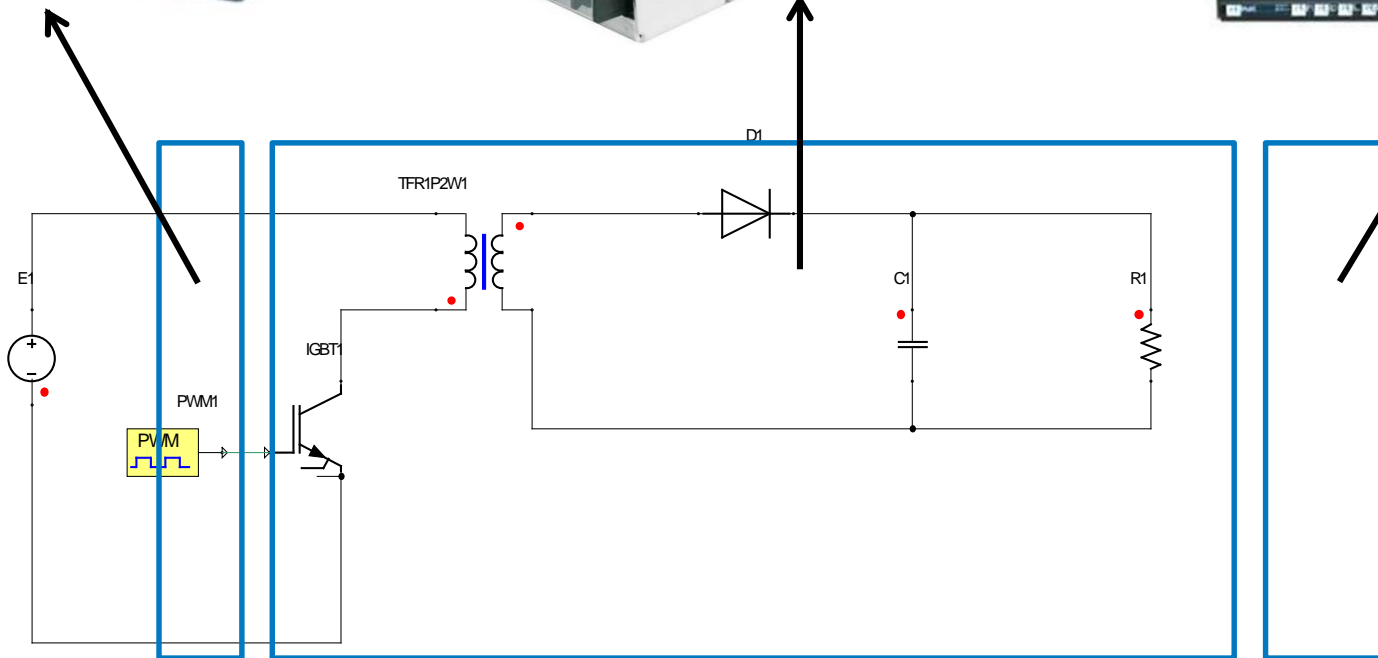
开关电源

磁
振
器



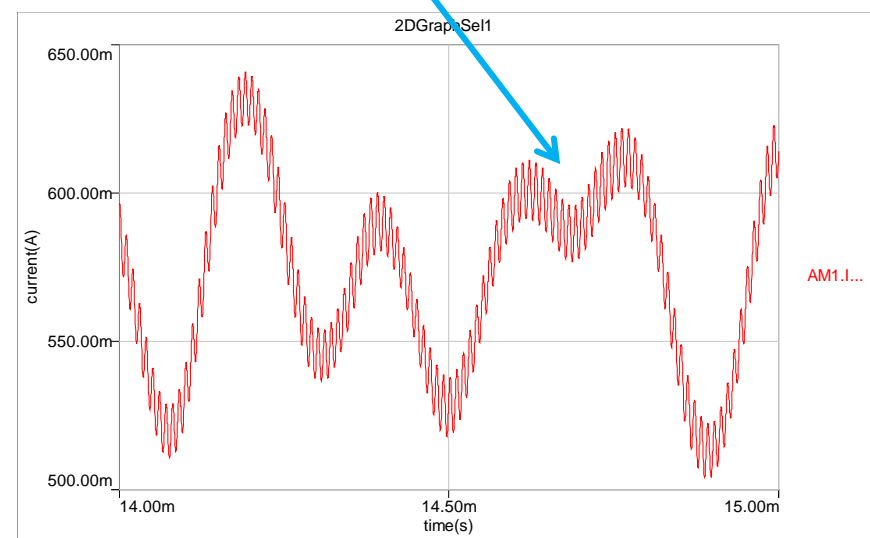
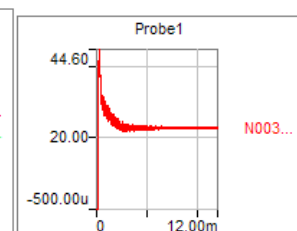
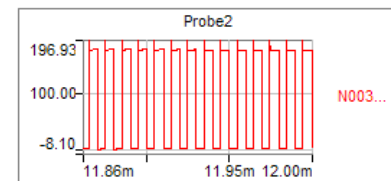
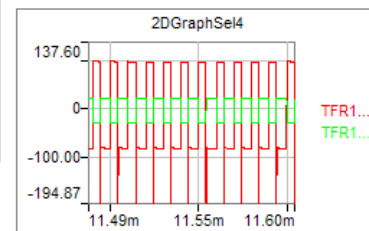
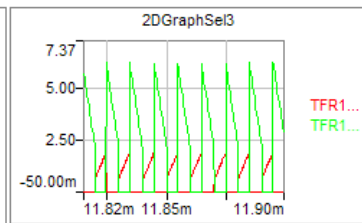
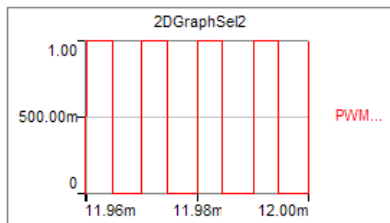
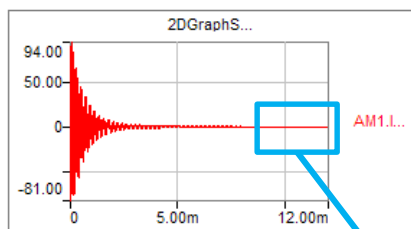
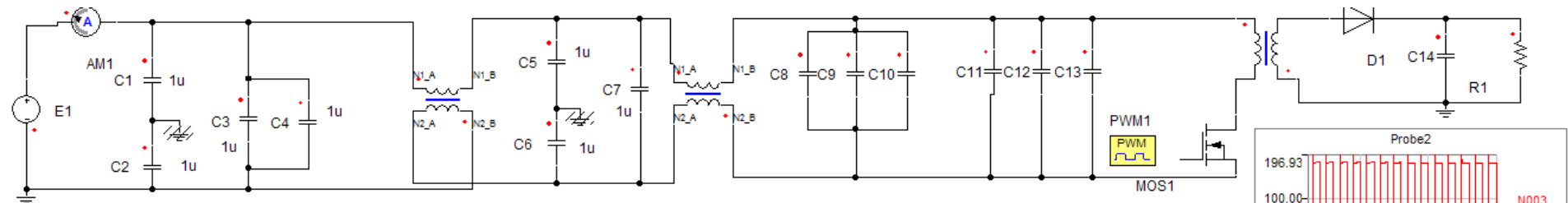
用
电
器

用电设备



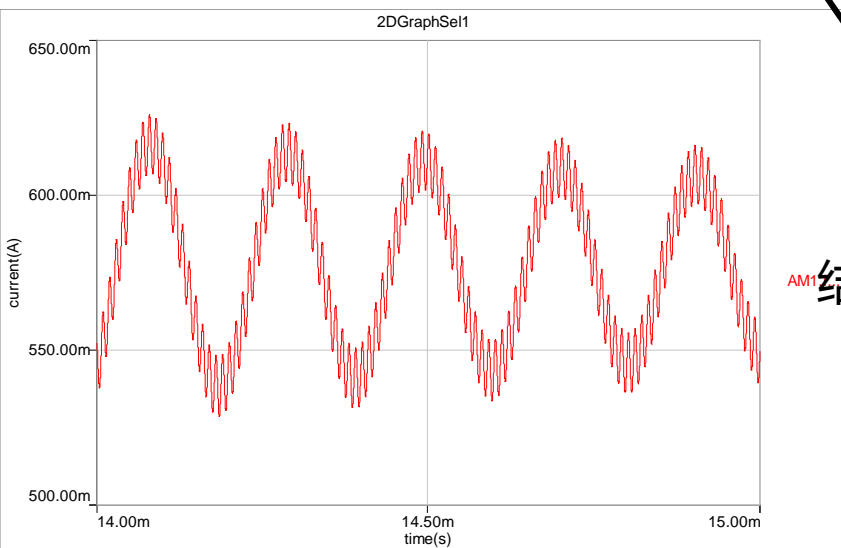
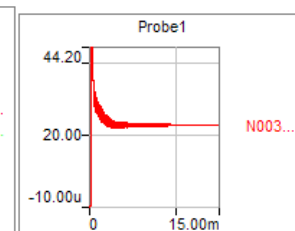
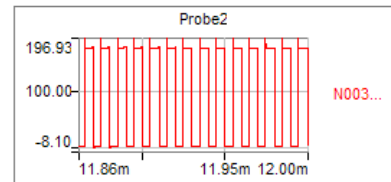
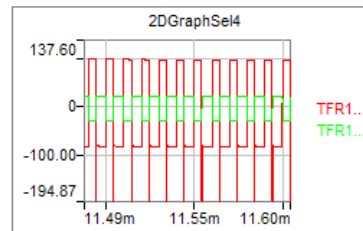
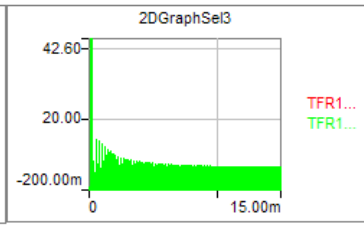
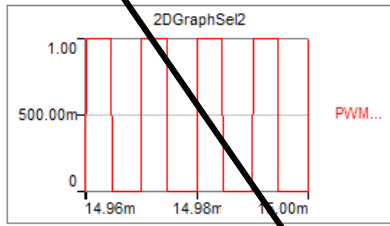
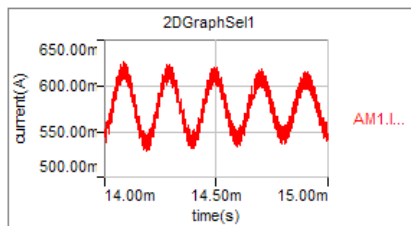
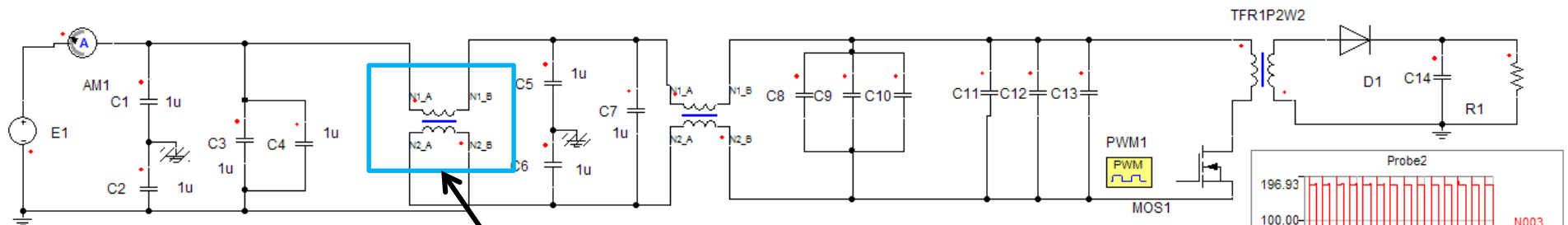
反激式开关电源拓扑

滤波电感未作优化：输入电流不稳定



■ 滤波电感未作优化，输入电流不稳定！

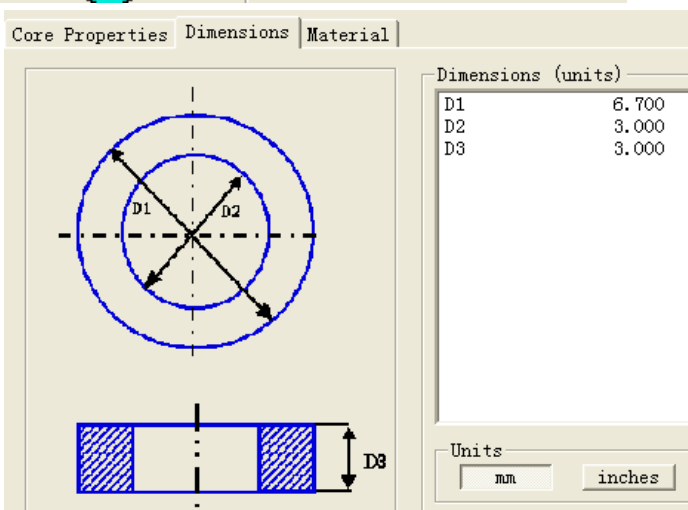
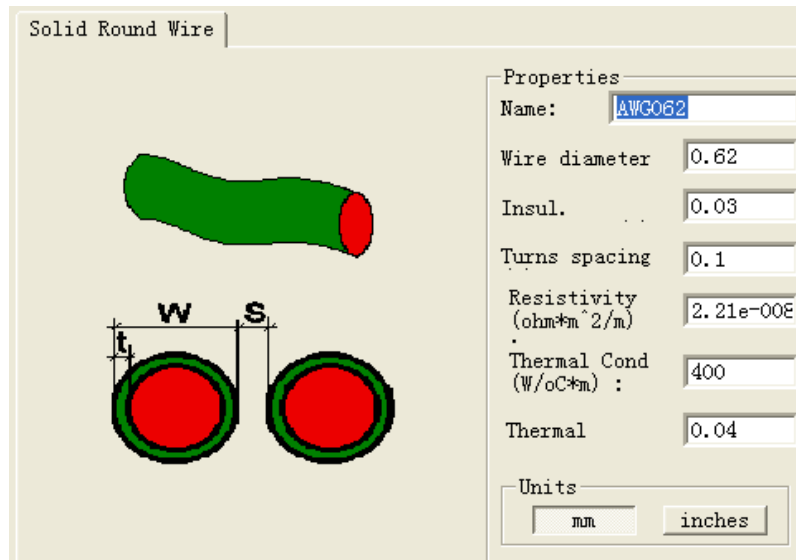
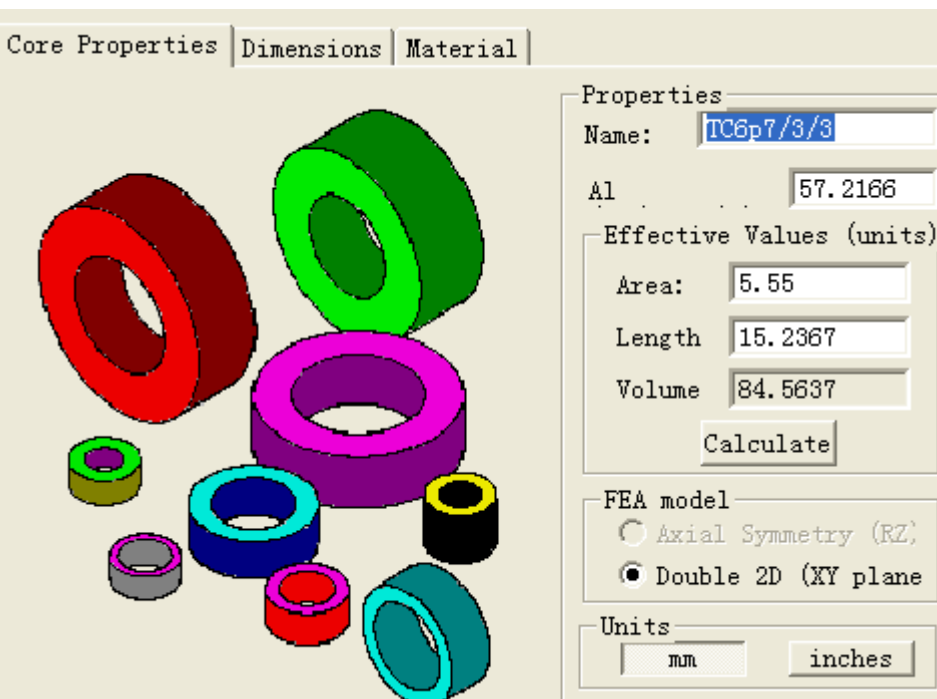
滤波电感优化后：输入电流稳定



■ 增大共模滤波电感值后，输入电流稳定。

AM1 结论：优化滤波电感可极大降低传导干扰风险！

PExprt可对上述滤波电感进行“专家设计”



■ 滤波电感/变压器专家建模功能

任意铁芯材料可自定义

Electrical Properties

Relative	100000
Initial Permeability	125
Core Resistivity	1

Thermal Properties

Thermal Conductivity	4
Thermal Emissivity:	0.4

Core Material Properties

Simplorer Non Linear Parameters | Jiles Atherton Hysteresis Curve

Hysteresis Curve Points

Saturation B	1.5
Saturation H	39900
Remanence B (T)	0.02
Coercive H	20

Non Available Data

Selected Level
Hyperbolic (Level)

Calculate Jiles Atherton Parameters

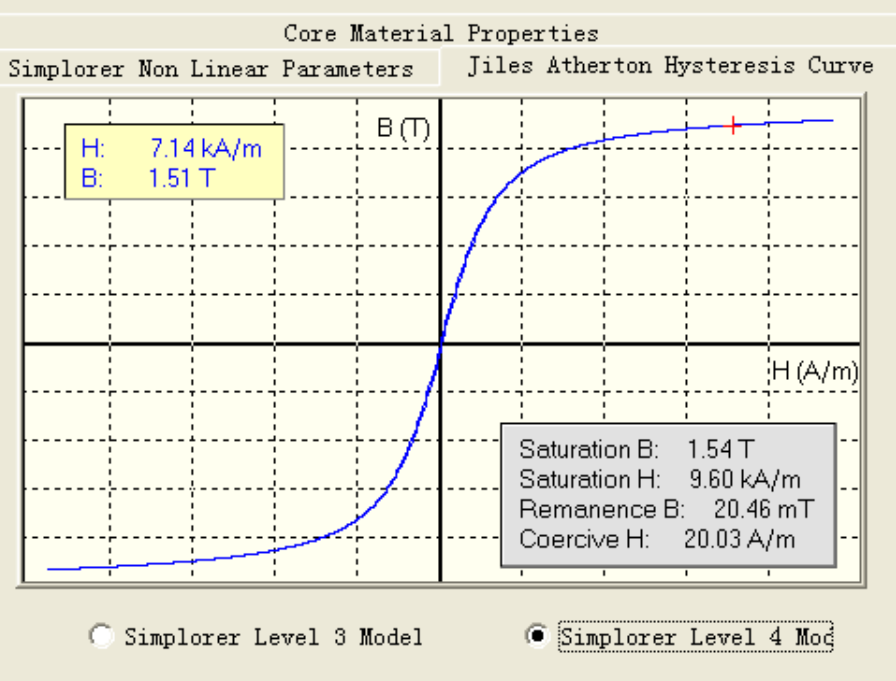
Jiles and Atherton Model Parameters:

Hyperbolic Parameters (Level 3)

A (A/m) (Thermal)	3653.95
C (n.u)	0.375995
K (A/m)	49.114
MS (kA/m)	1205.04

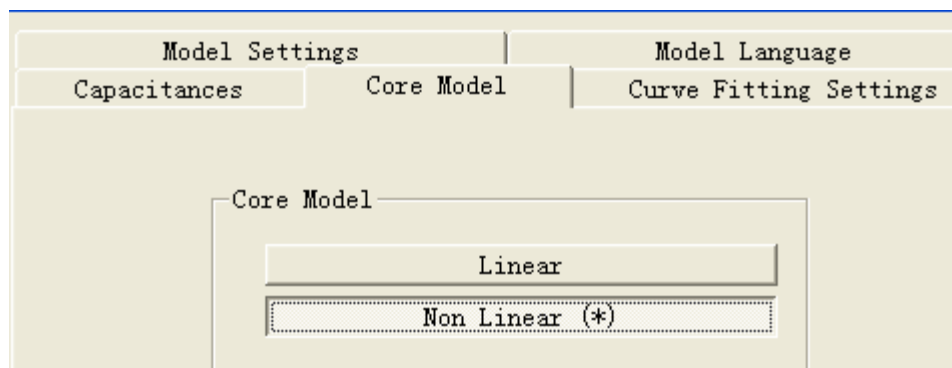
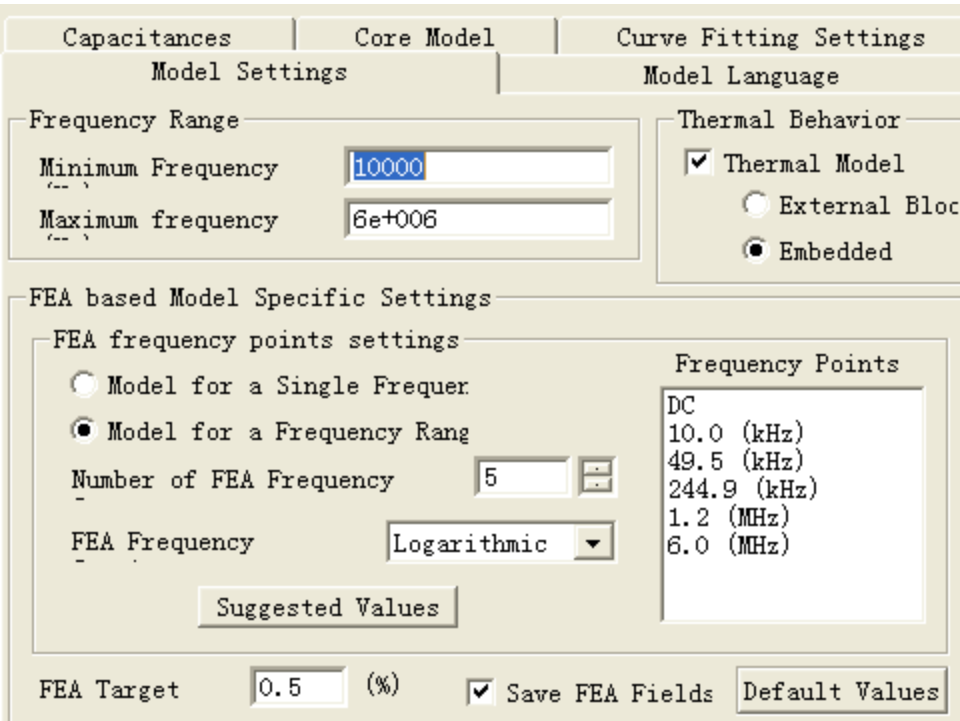
Langevin Parameters (Level 4)

A (A/m) (Thermal)	1054.6
C (n.u)	0.108763
K (A/m)	44.2098
MS (kA/m)	1202.34
Alpha (n.u)	0.000117



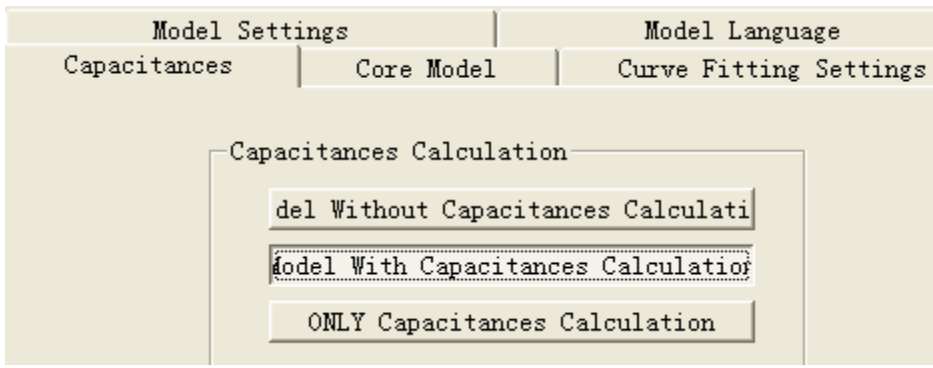
- 便捷的用户自定义材料库功能：如H125

丰富的建模选项

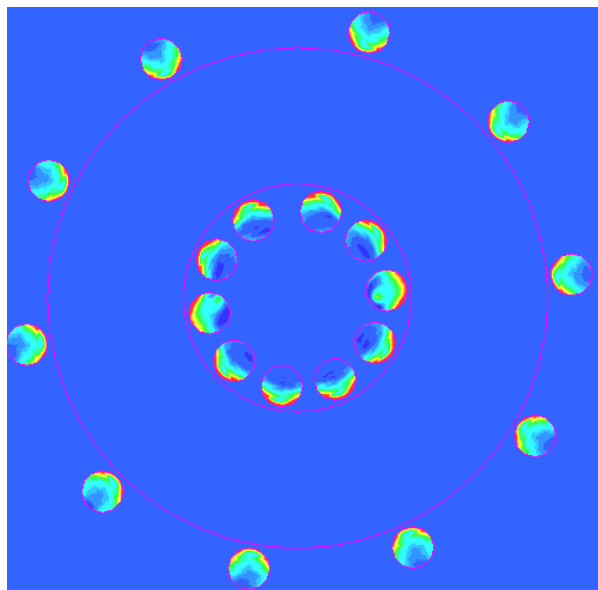
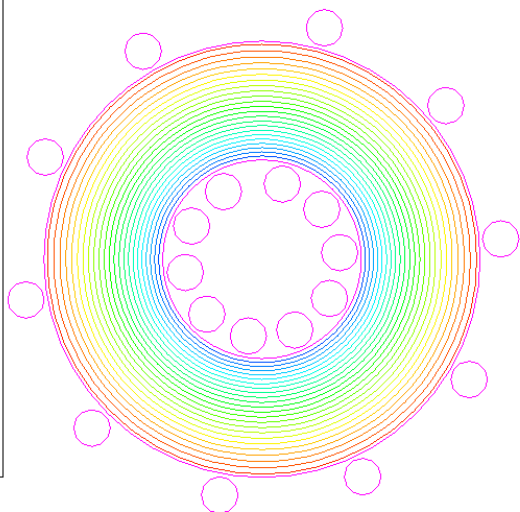
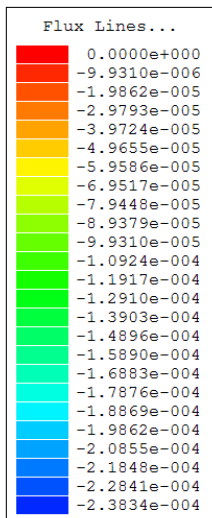


丰富的建模选项设置功能:

- ✓ 频率特性；
- ✓ 热特性；
- ✓ 非线性铁心；
- ✓ 寄生/耦合电容等。

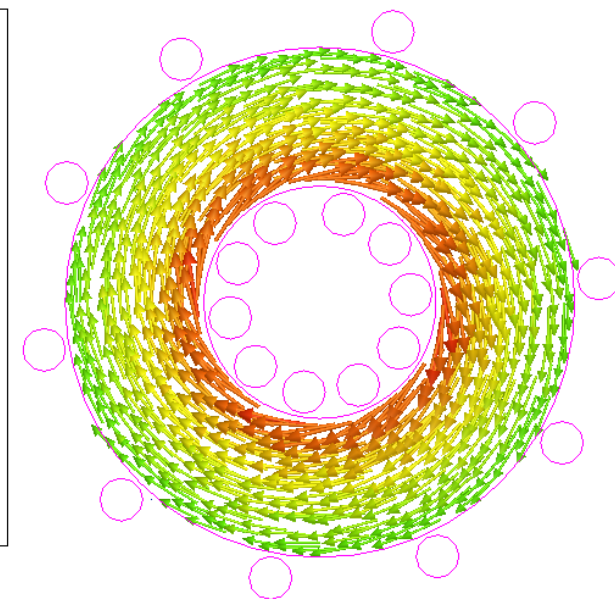
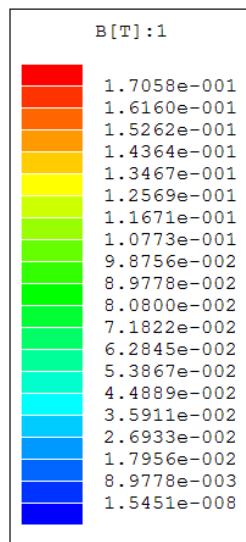
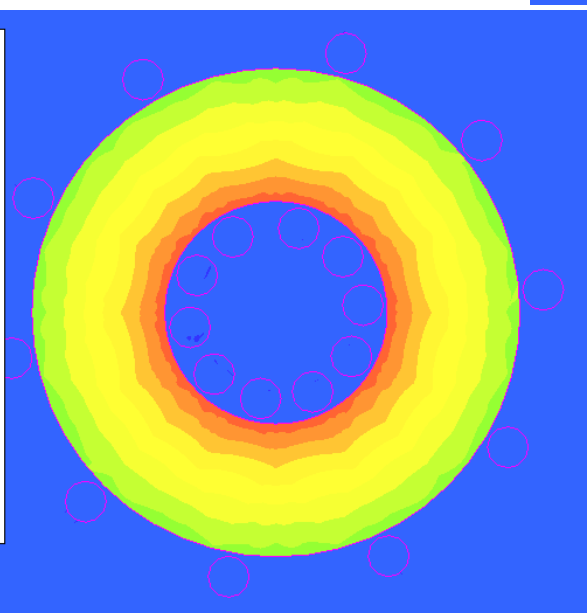
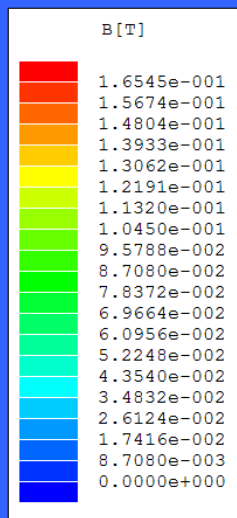


滤波电感精确设计和性能分析

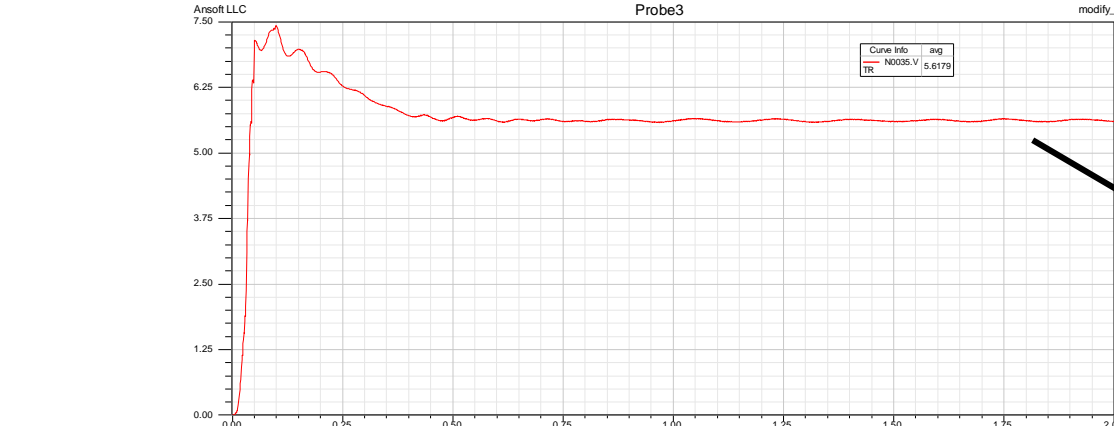
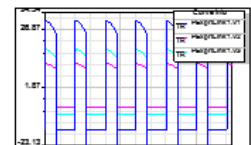
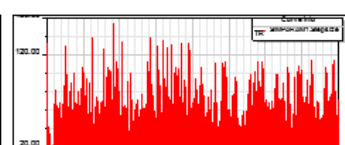
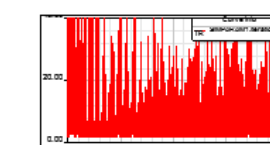
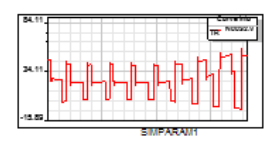
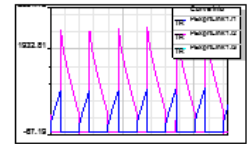
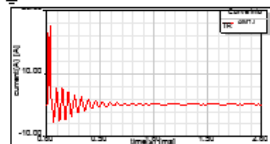
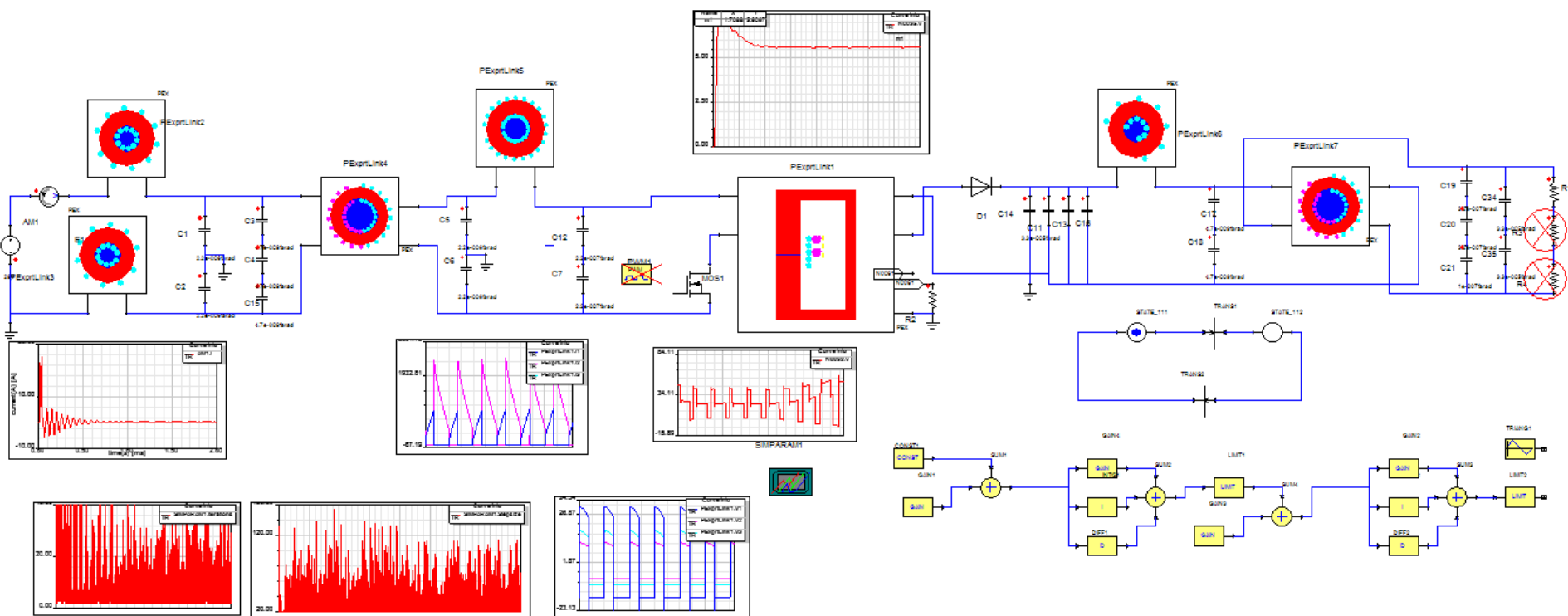


■ 场量仿真结果：

- ✓ 磁力线；
- ✓ 磁密幅值和矢量；
- ✓ 考虑集肤效应和邻近效应的电密分布等。



集成PExprt模型的电路传导干扰分析

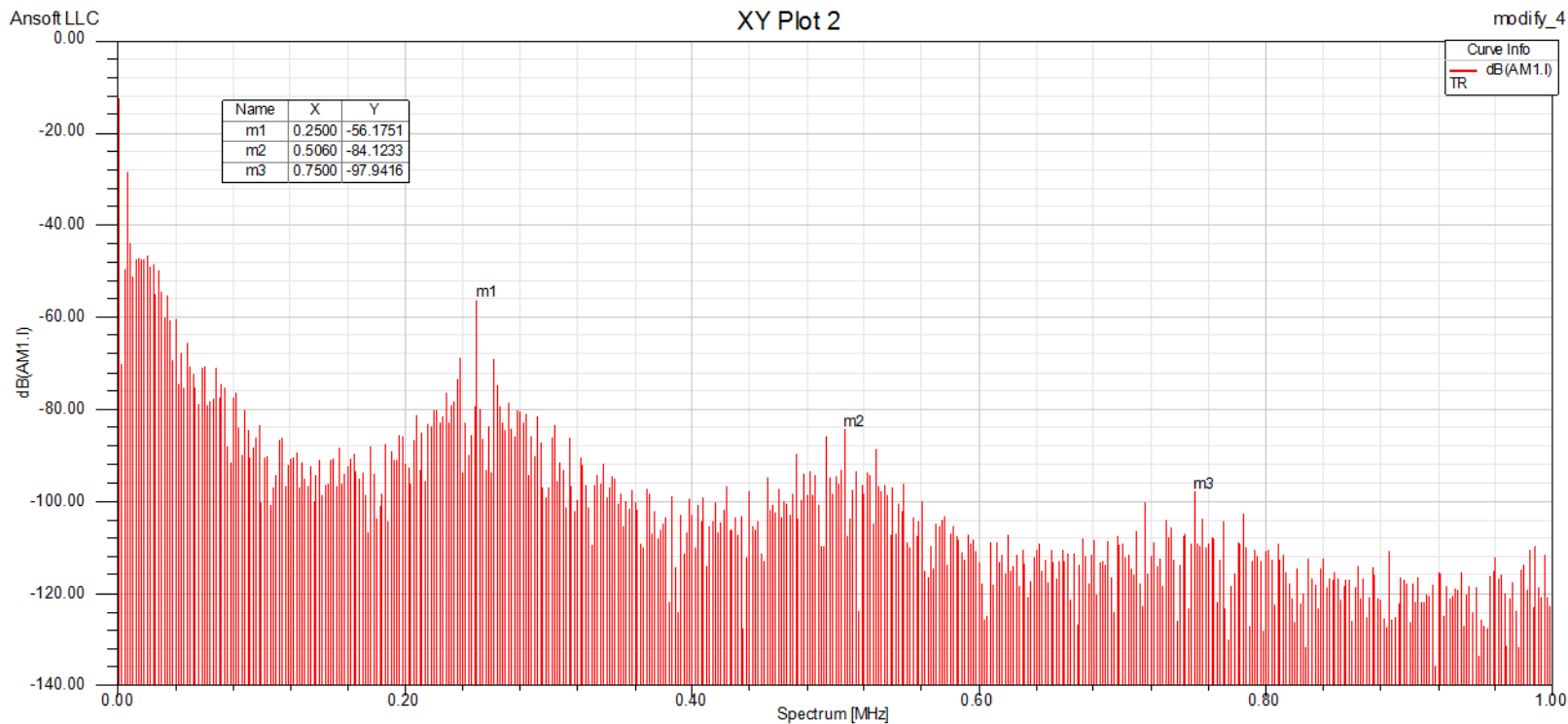


- 输出电压稳定在5.5V；
- 电路工作正常，可进行精确CE分析。

优化滤波电感后仿真分析结果

■ 优化滤波电感，对稳定后的输入电流波形FFT分析：

- ✓ 主开关频率250KHz的各次谐波含量较大；符合理论分析值。
- ✓ 后期个通过进一步优化设计滤波电感抑制传导干扰。



总结

- **关键部件工程化分析能力**：ANSYS具有电源设备传导干扰仿真分析需要用到的关键部件工程化分析能力，如IGBT、电感、变压器、线缆、母排等。
- **部件与系统层次化集成能力**：针对不同层次的电磁干扰分析问题，以部件工程化分析为基础，ANSYS可提供层次化的部件与系统集成能力，可针对性的解决EMC分析面临的“黑盒子-灰盒子-白盒子”问题。
- **无缝集成与拓展能力**：电源设备传导干扰仿真工具可与现代企业现有仿真能力无缝集成，可有效降低软件重复采购风险，降低工程师使用门槛，提高软件的利用率。
- **本地化与专家技术支持**：ANSYS具有层次化、专职技术支持团队，针对电源设备传导干扰仿真分析问题，可提供本地化、专业化的技术支持。对于本地无法处理的复杂问题，可提供层次化专家技术支持。

ANSYS®



ANSYS中国技术大会
中国·上海

感谢聆听