

ICSC 2017

CAE for virtual product
CAE for innovation
CAE for process transformation

IDAJ CAE Solution Conference

新能源车电磁兼容综合仿真与实践

IDAJ中国

技术部 ANSYS电磁产品组 刘捷

目录

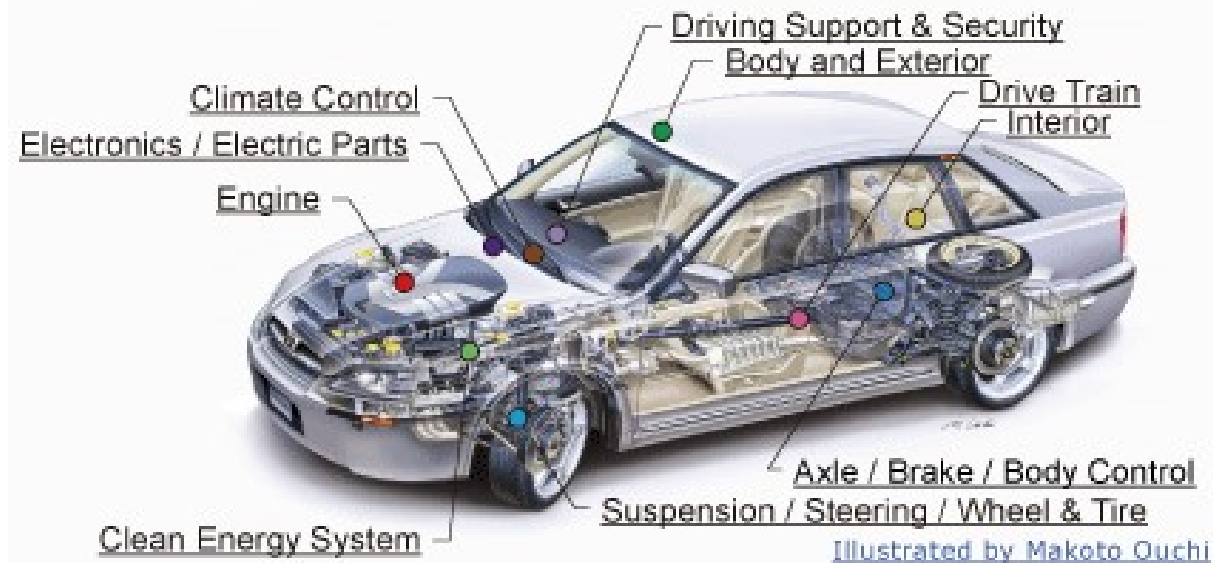
- 1 汽车电磁兼容设计挑战
- 2 ANSYS 汽车兼容仿真思路
- 3 ANSYS 汽车电磁兼容仿真设计案例
- 4 ANSYS 汽车电磁兼容虚拟测试验证
- 5 总结

汽车发展重要趋势——“电子化”



- 控制系统电子化：电机数量增加35%以上（动力控制、遥控门锁、智能钥匙、碰撞警告、安全制动）；
- 高电压技术：42V技术、提高效率、电机的功率等级提高，400V电池组；
- 系统集成度更高：定速巡航、卫星导航、智能交通、无人驾驶等；

汽车电磁环境日益复杂



Example: Subsystems of one system – Engine

Engine Block	Valvetrain
In-Cylinder and Combustion	Ignition System
Air/Fuel Management	Turbo/Supercharger
Gasoline Fuel Injection System	Engine Lubricating System
Diesel Injection System	Engine Cooling System
Alternative Fuel System (LPG, CNG, etc)	Engine Electric System
Fuel Handling and Evaporator System	Engine Control System
Exhaust System	Other Engine Parts

**An “Automotive Readiness Matrix”
has been prepared to identify the
sub-systems with the most
promising immediate opportunities**

<https://sites.google.com/a/ansys.com/automotive/marketing-material/automotive-overview-marketing-material/automotive-readiness-matrix>

新能源汽车电磁环境更加复杂

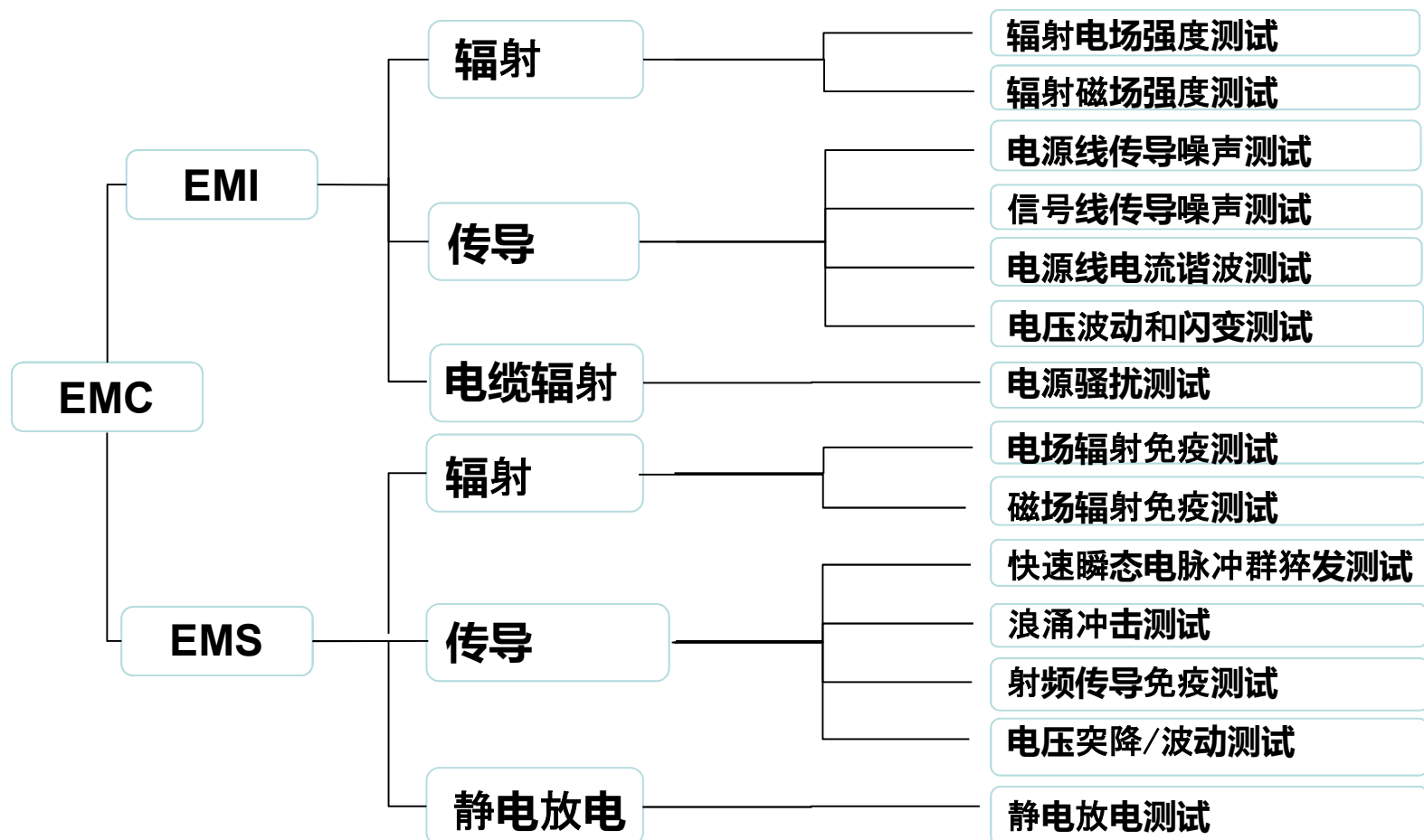


参考文献:《电动汽车高压系统电压等级技术规范》

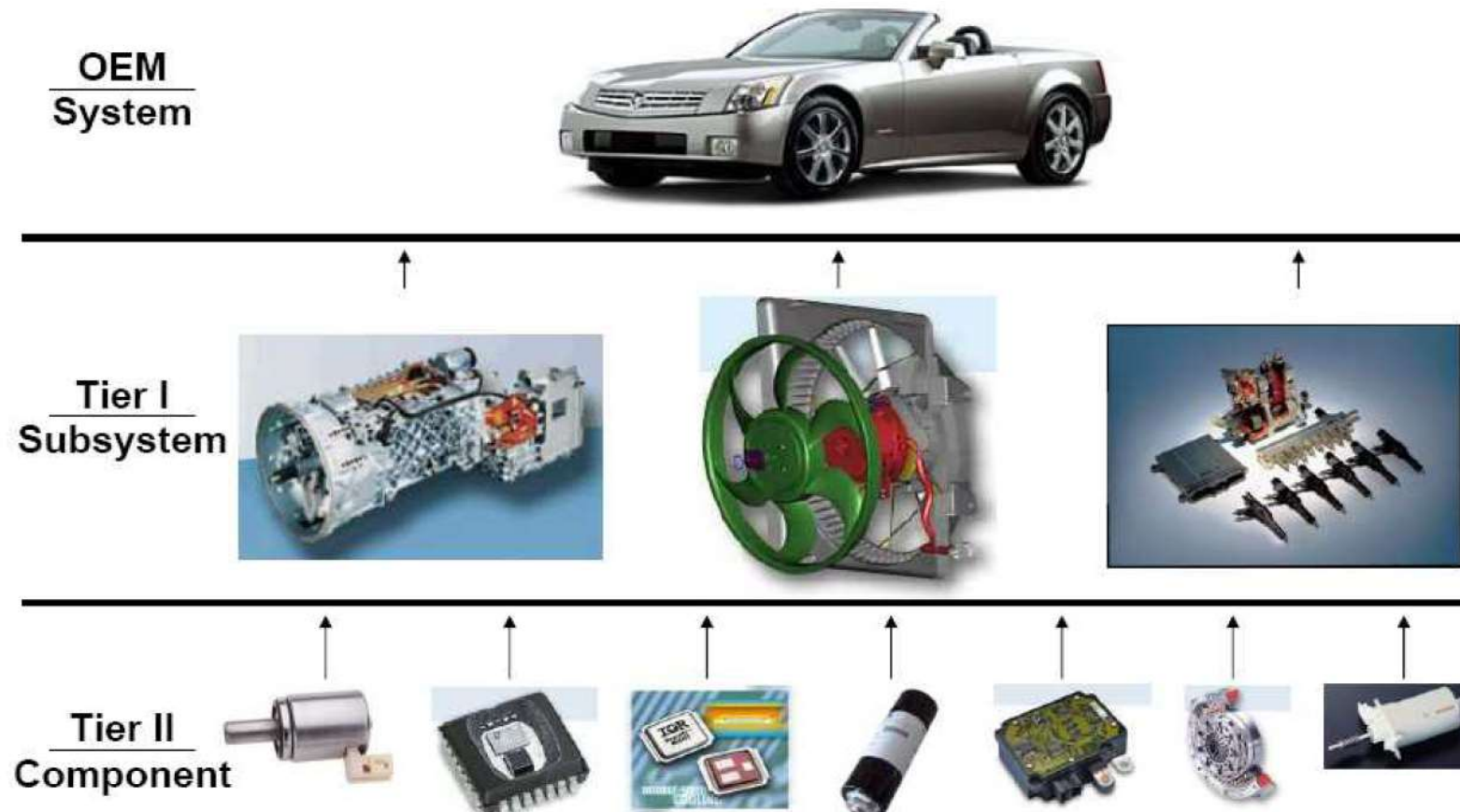
车辆EMC测试标准

	EMI	EMS
ISO	7637 (电源线传导)	
		11451 (整车)
		11452 (零部件)
		10605 (车载ESD) TR10305 (校准)
IEC/CISPR	CISPR12 (整车火花点火)	
	CISPR25 (零部件)	
ECE	R10 (零部件, 非强制标准)	
EEC	2004/104/EC (整车和零部件, 强制执行)	
SAE	J551 (整车) J1113 (零部件)	
GB	14023-2000 (整车火花点火)	17619-1998 (电子零部件)
	18387-2001 (电动车辆)	
	18655-2002 (零部件)	

车辆EMC测试分类

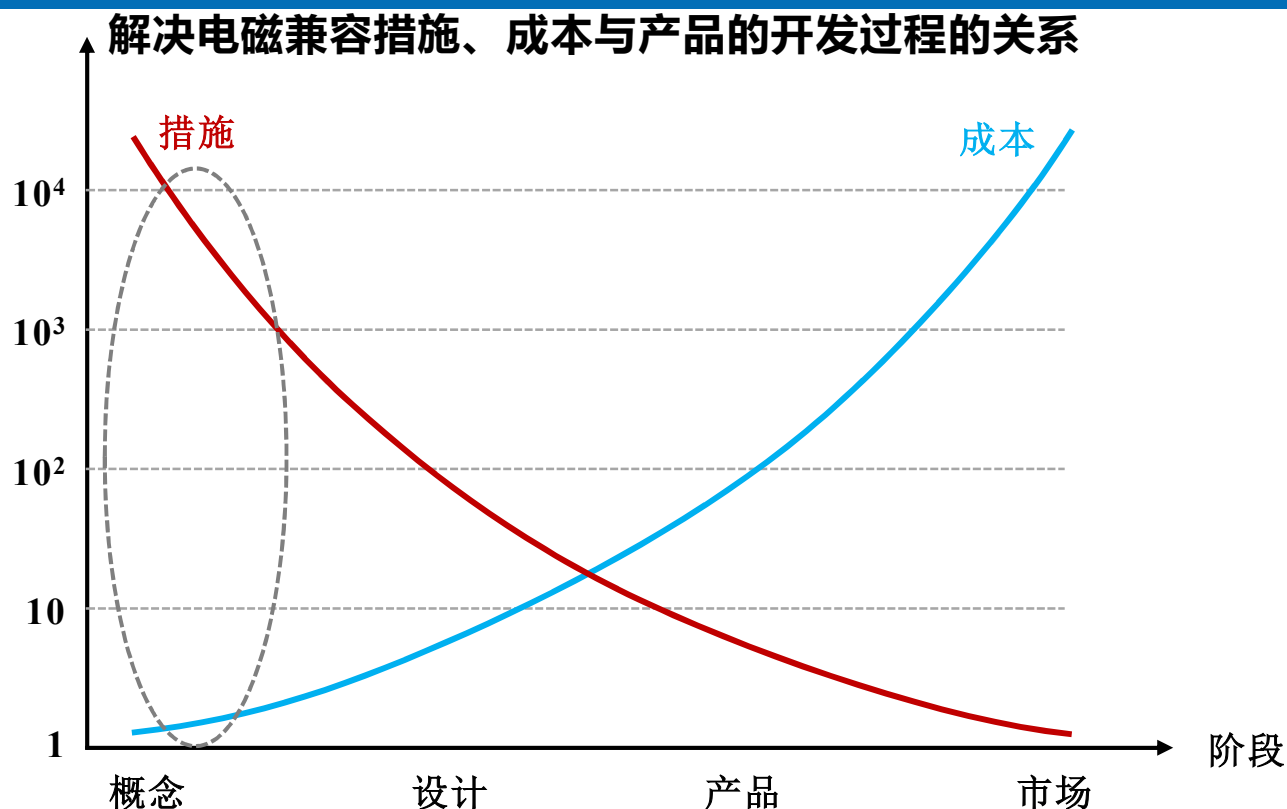


电磁兼容设计是一项复杂的系统工程



ISO/IEC 15288:2008: "A combination of interacting elements organized to achieve one or more stated purposes."

尽早解决电磁兼容问题十分必要



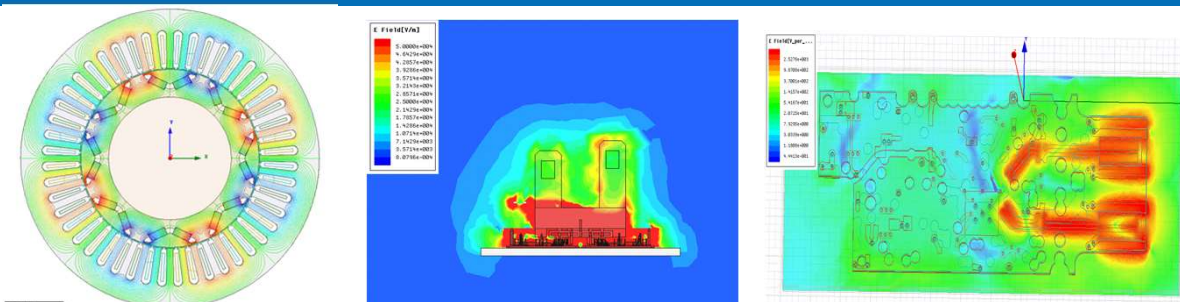
- 解决电磁兼容问题的成本随着开发过程的呈指数级增长
- 越早发现电磁兼容问题，解决方法就越多
- 若后期才发现问题，解决的措施就大大减少，难度也会大很多
- **基于虚拟原型的仿真，是在早期发现电磁兼容问题、研究解决措施的最佳手段**

参考文献：朱立文，电磁兼容设计与整改对策及案例分析，北京：电子工业出版社，2012

汽车电磁兼容仿真挑战

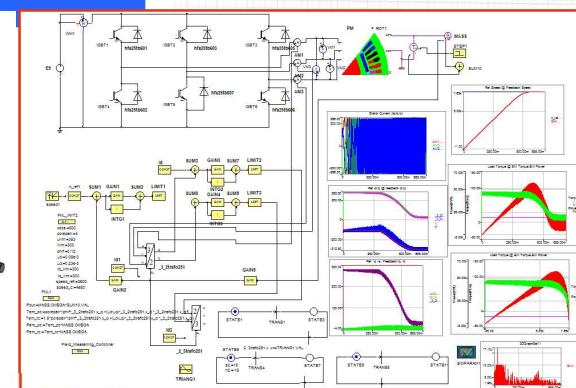
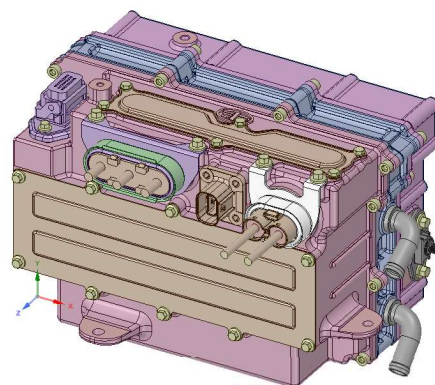
部件级

- 电源、电机、变流器、WPT
- 车载电子控制单元 (ECU)
- 车载天线、GPS、线缆



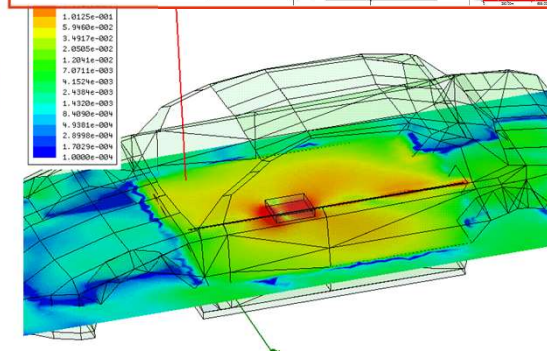
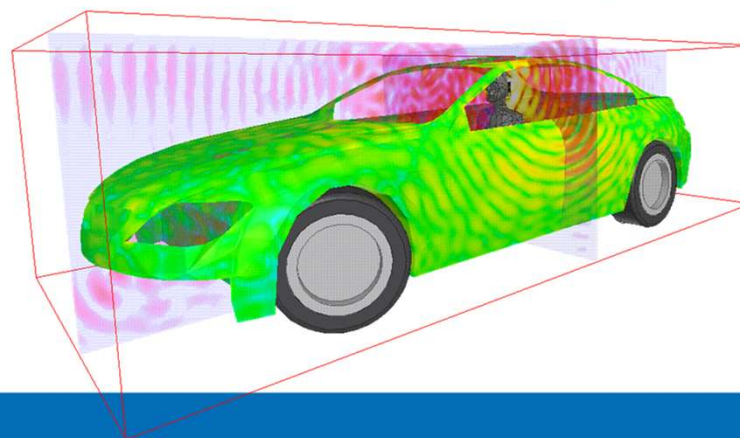
设备级/子系统级

- 各设备的辐射、抗干扰、ESD
- 功率电子、驱动控制子系统



系统级

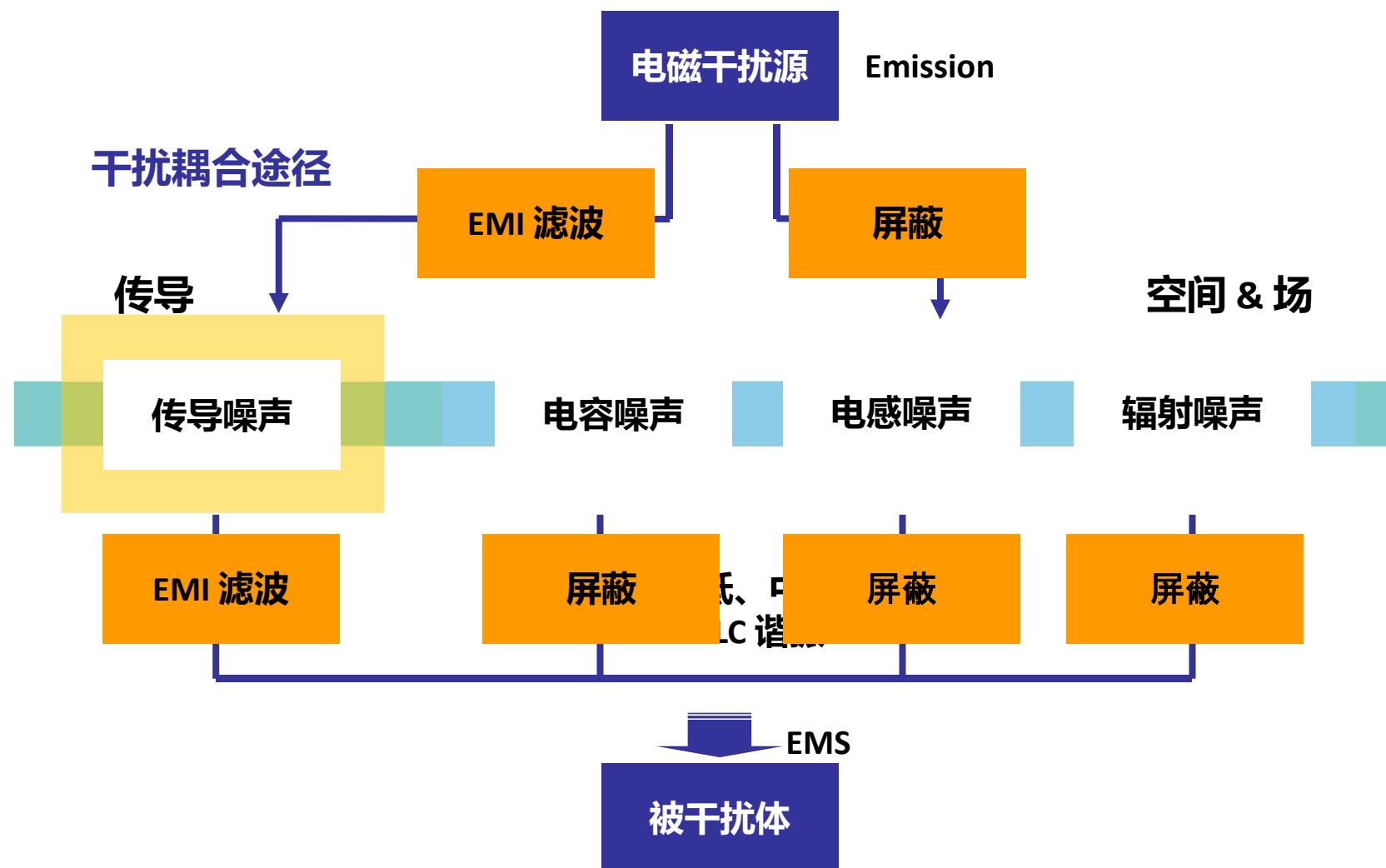
- 设备间电磁干扰
- 整车电气布局
- 整车辐射与屏蔽



目录

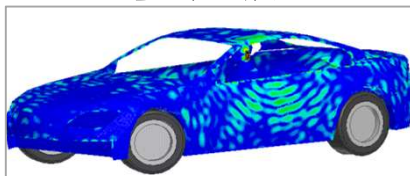
- 1 汽车电磁兼容设计挑战
- 2 ANSYS 汽车兼容仿真思路
- 3 ANSYS 汽车电磁兼容仿真设计案例
- 4 ANSYS 汽车电磁兼容虚拟测试验证
- 5 总结

EMI/EMC 分析一般思路

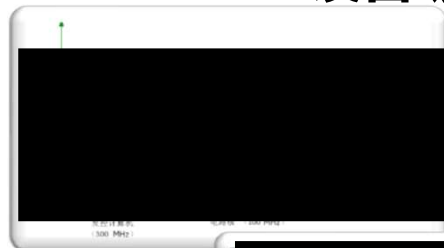


全系统仿真面临的主要困难——数据不全

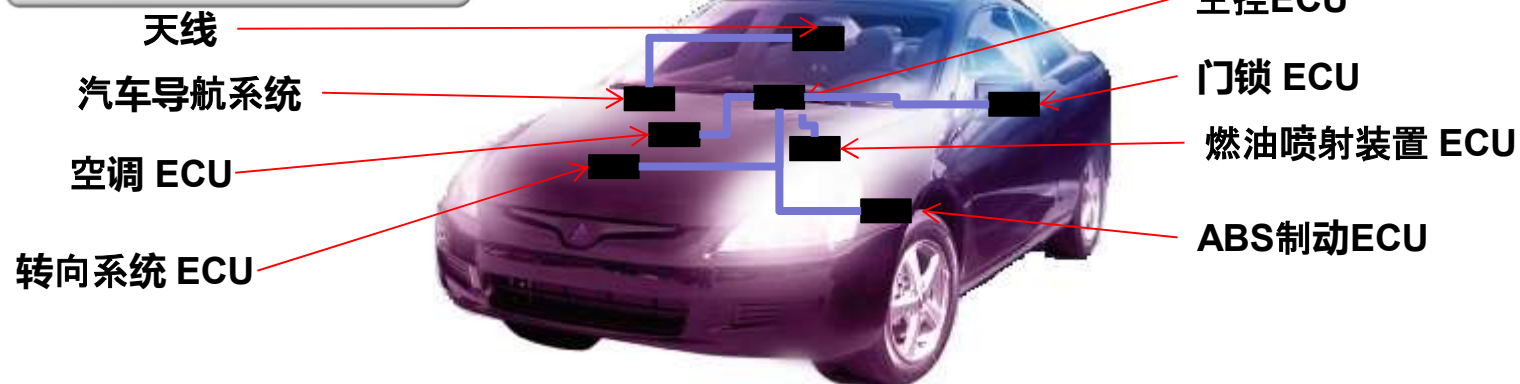
系统级



设备级



部件级



全系统电磁兼容仿真的三个层次

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

*** 针对不同的问题需要采用不同的仿真方法。**

目录

- 1 汽车电磁兼容设计挑战
- 2 ANSYS 汽车兼容仿真思路
- 3 ANSYS 汽车电磁兼容仿真设计案例
- 4 ANSYS 汽车电磁兼容虚拟测试验证
- 5 总结

线缆干扰及优化

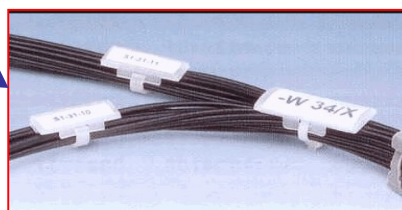
案例分享---线缆干扰分析



车载电机系统



灯光照明系统



空间限制使得不同系统的线缆被捆扎在一起

电机工作时车辆照明系统受到严重干扰!

线缆干扰分析---灰盒子分析

- 具备数据
 - 车体结构
 - 线缆Layout信息
 - 电机驱动电路
 - 电机模型（可选）
- 获得结果
 - 复现干扰现象
 - 针对线缆进行滤波、布局、信号分配、接地等优化

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

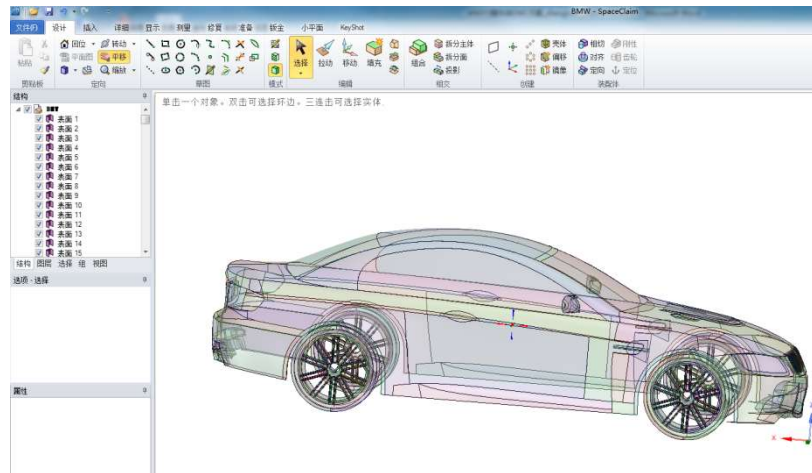
模型导入简
化

电气模型抽
取

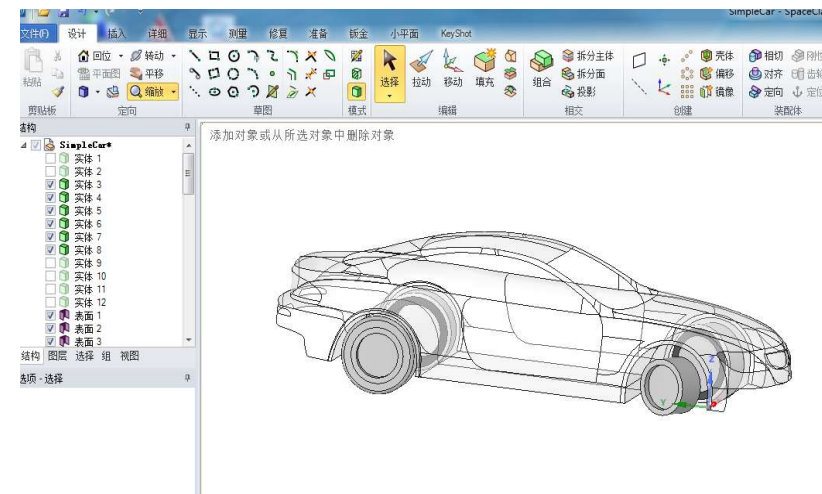
系统电路仿
真

设计优化

线缆干扰分析---模型导入简化

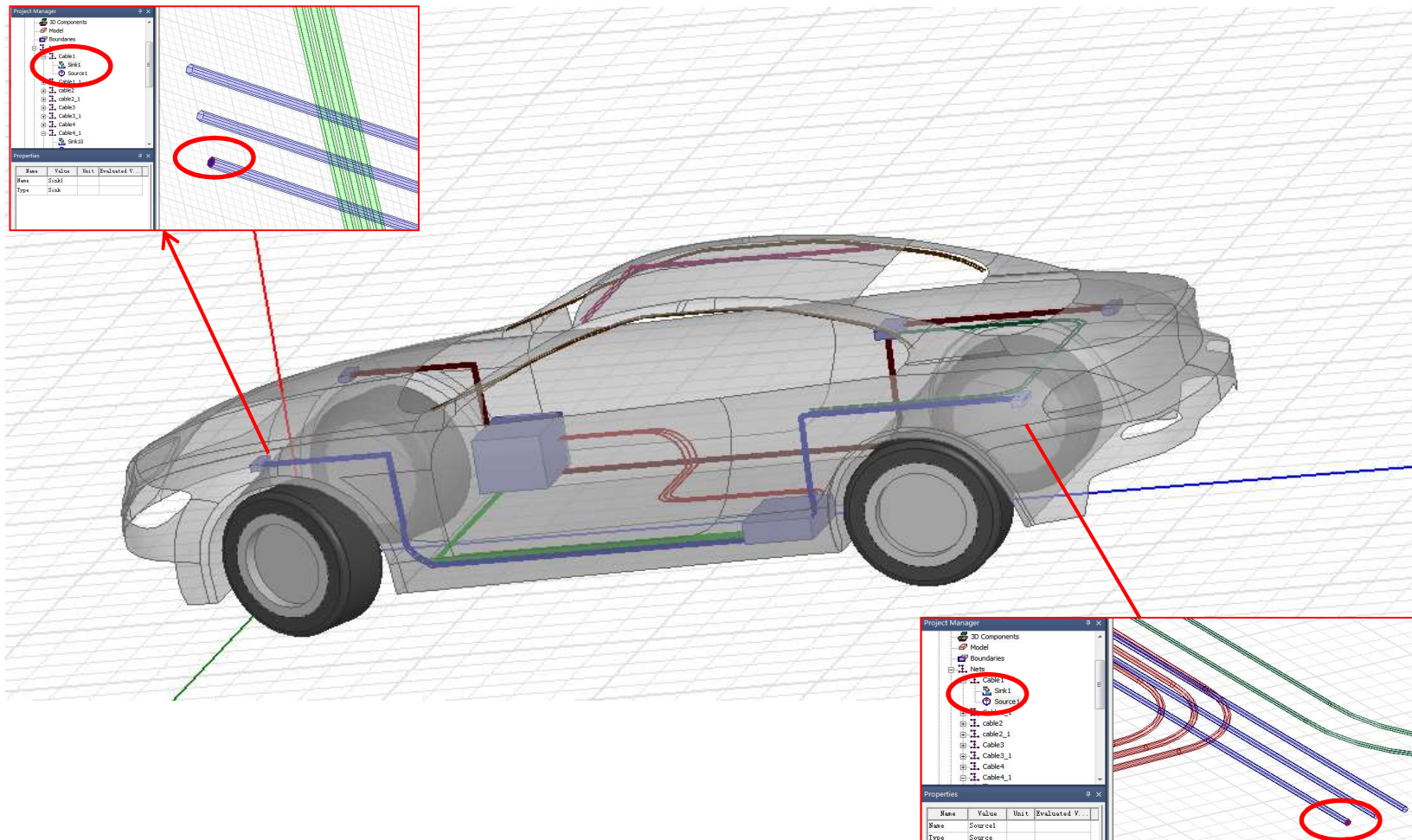


模型
简化

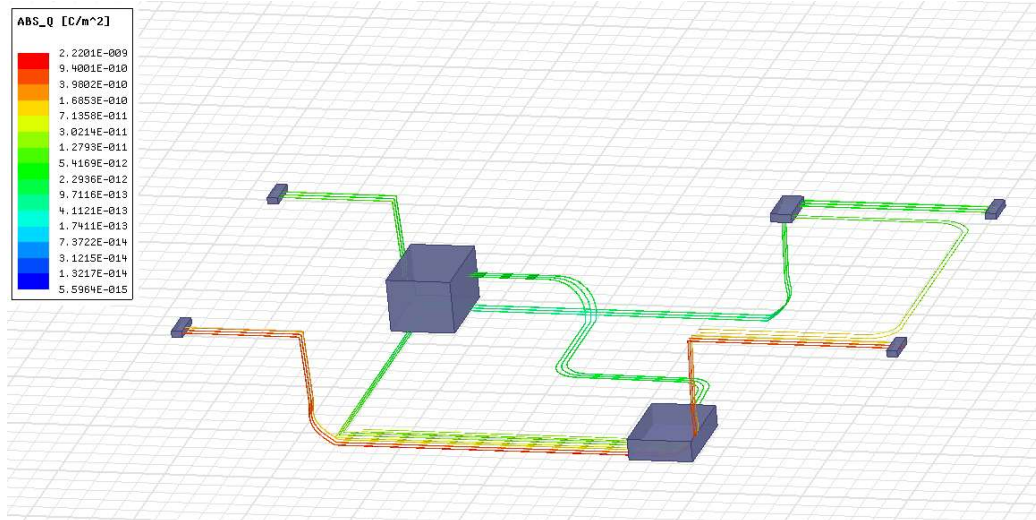


线缆干扰分析---车体线缆电磁仿真

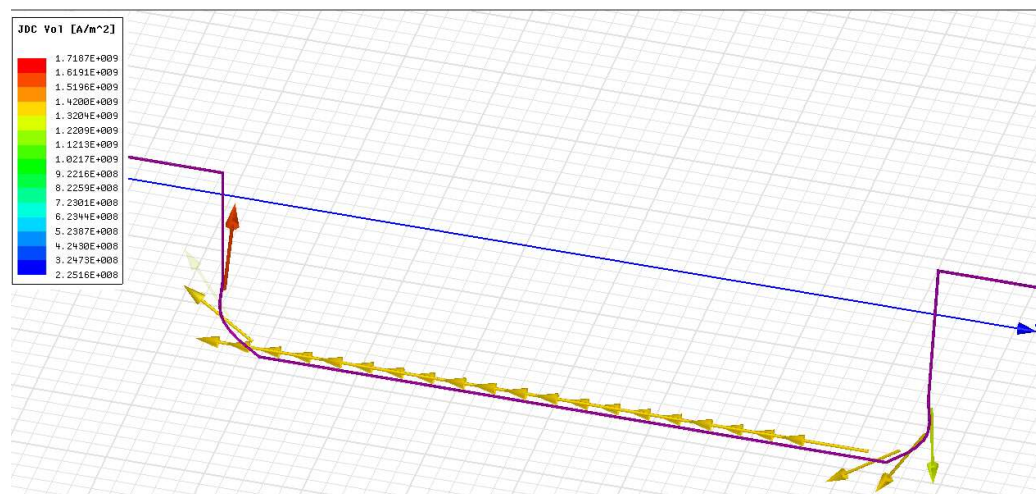
通过定义每根线缆的Source和Sink，可得到车内所有线缆的传输和耦合特性。



线缆电磁仿真结果

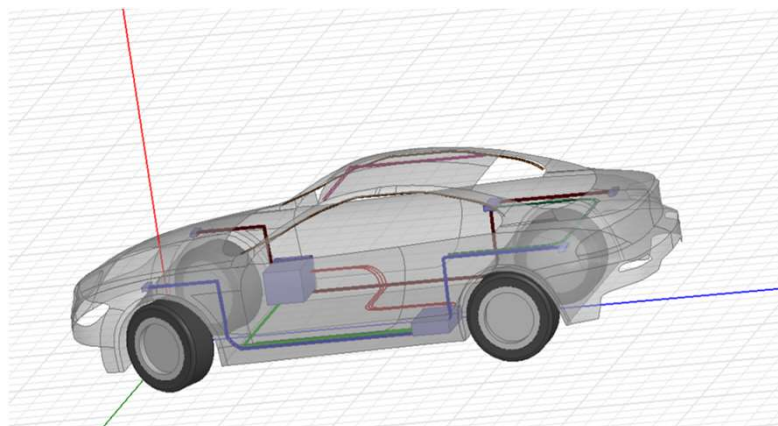


线缆上电荷分布

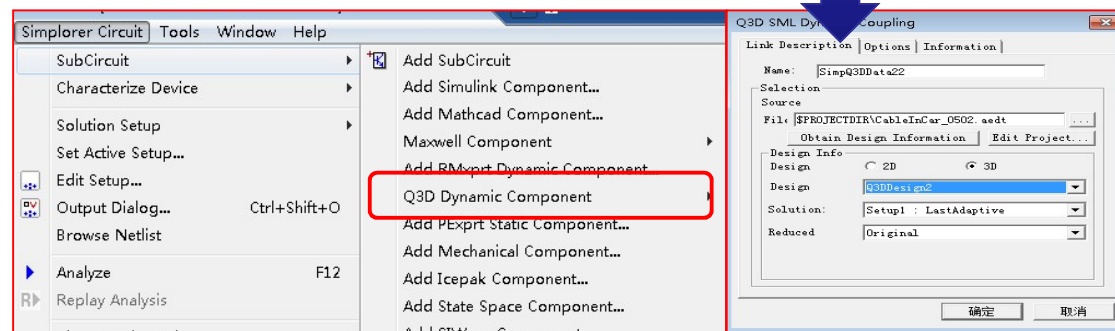


线缆表面电流密度

线缆电气模型抽取

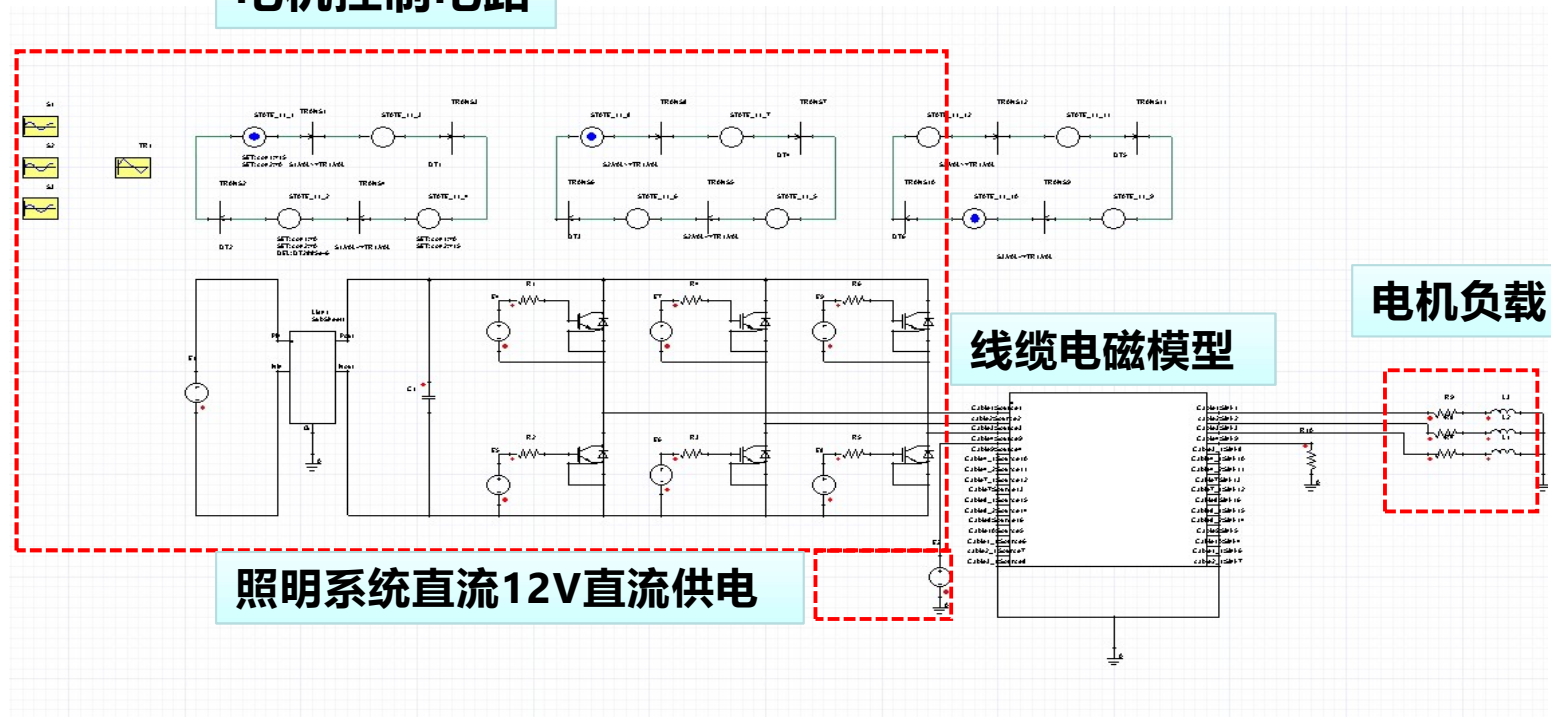


直接输出线缆电磁模型并导入系统
电路仿真工具中进行下一步仿真。



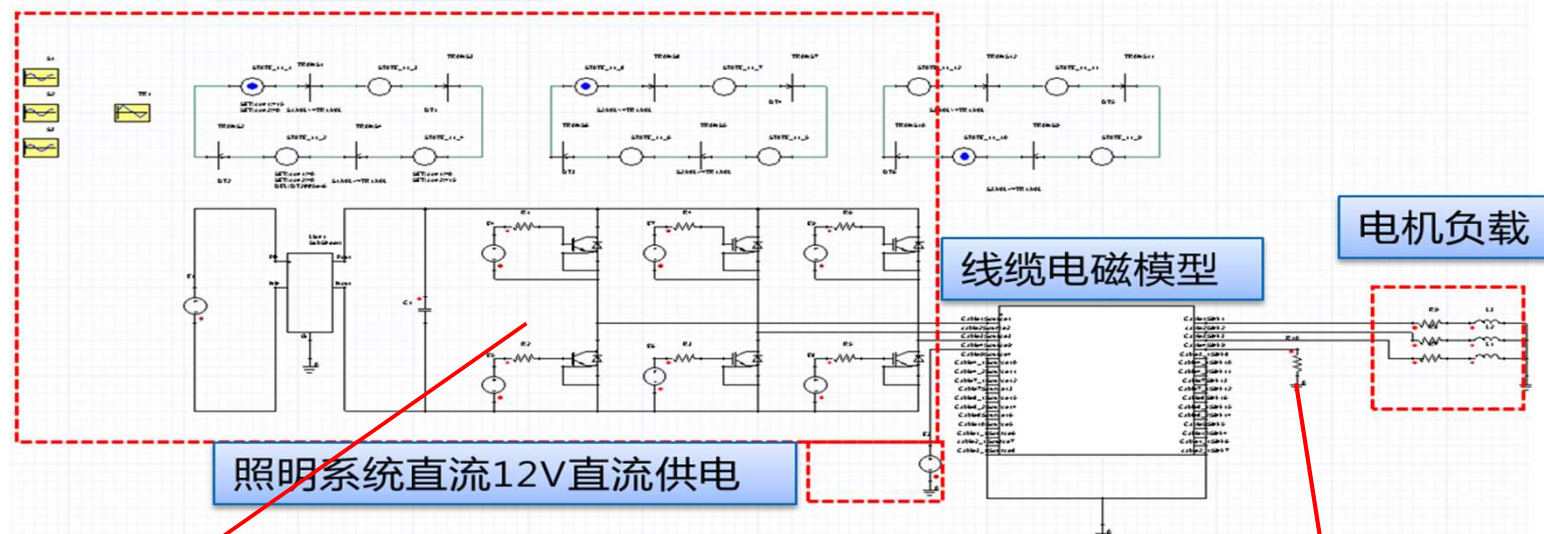
系统电路仿真

电机控制电路

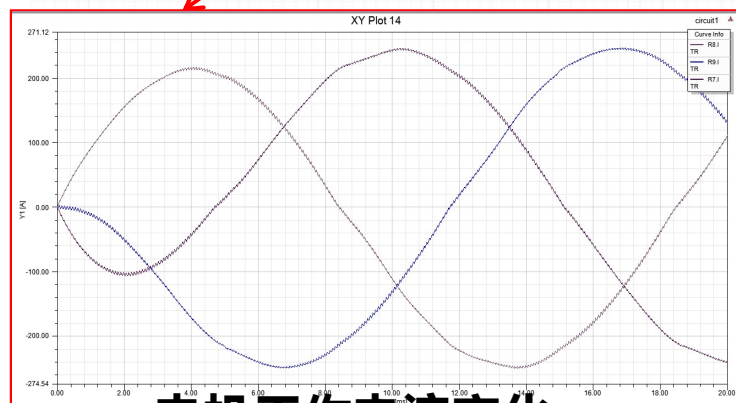


系统电路仿真结果

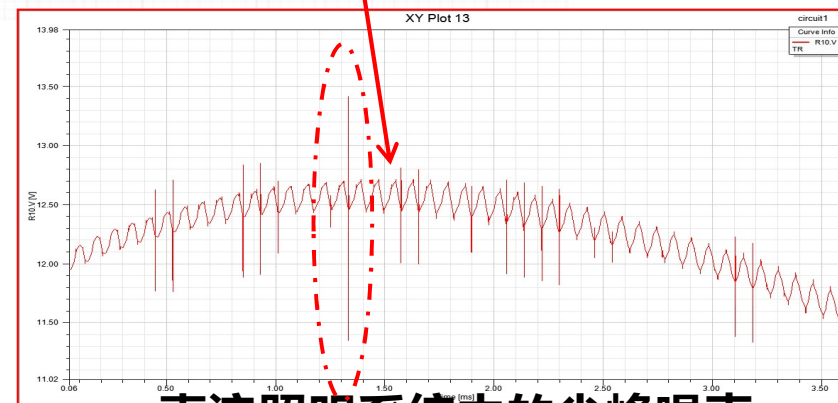
电机控制电路



照明系统直流12V直流供电



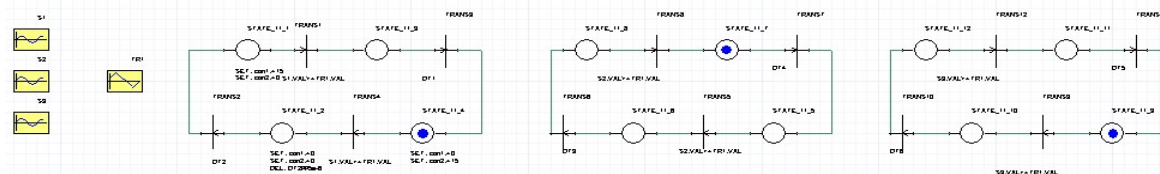
电机工作电流变化



直流照明系统中的尖峰噪声

线缆干扰优化---LC滤波

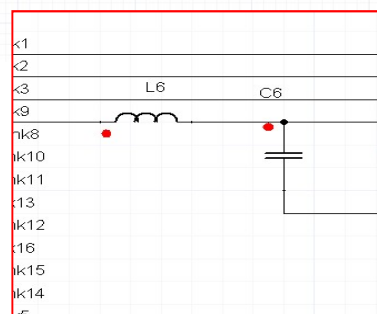
电机控制电路



线缆电磁模型

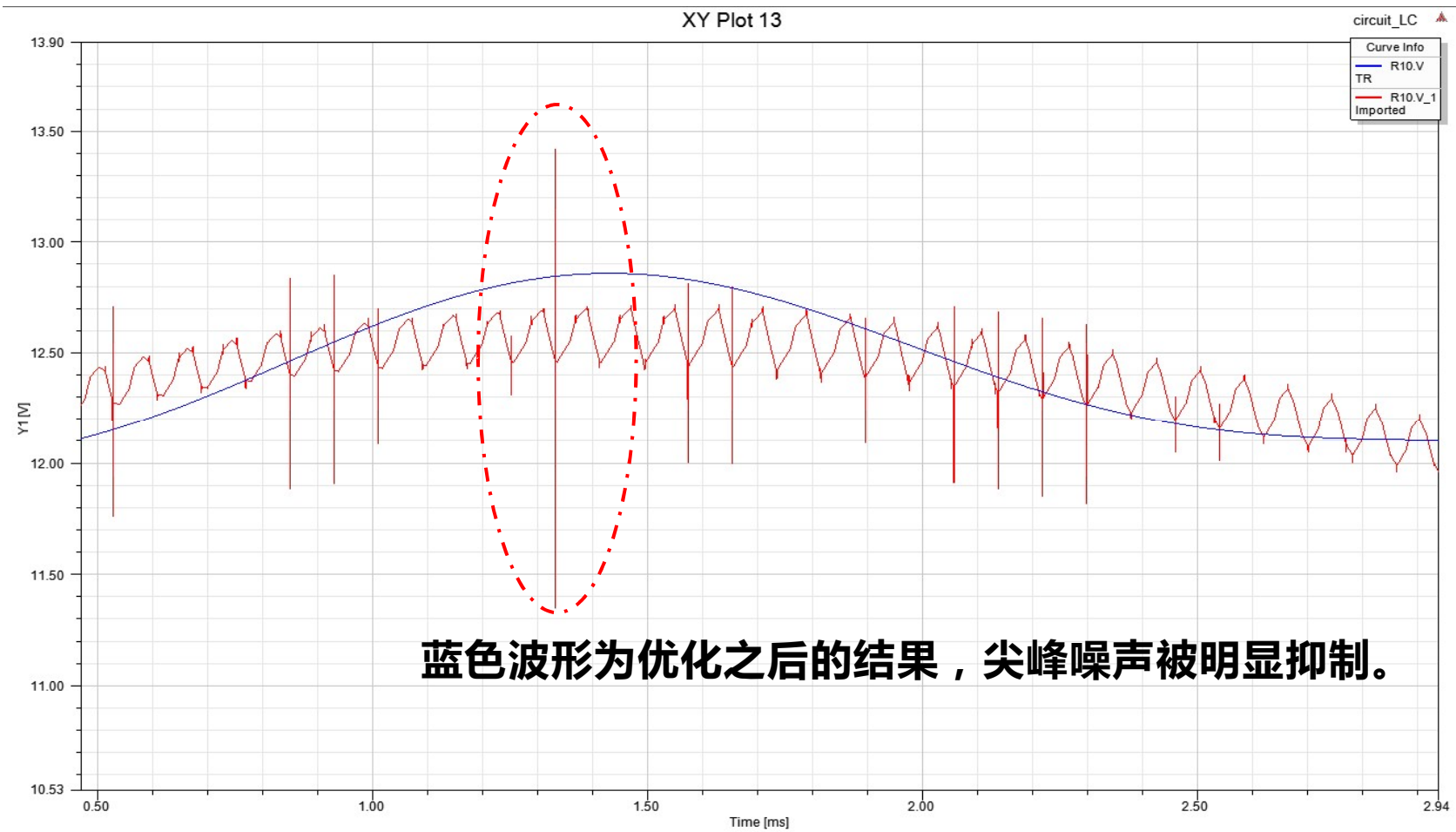
电机负载

照明系统直流12V直流供电

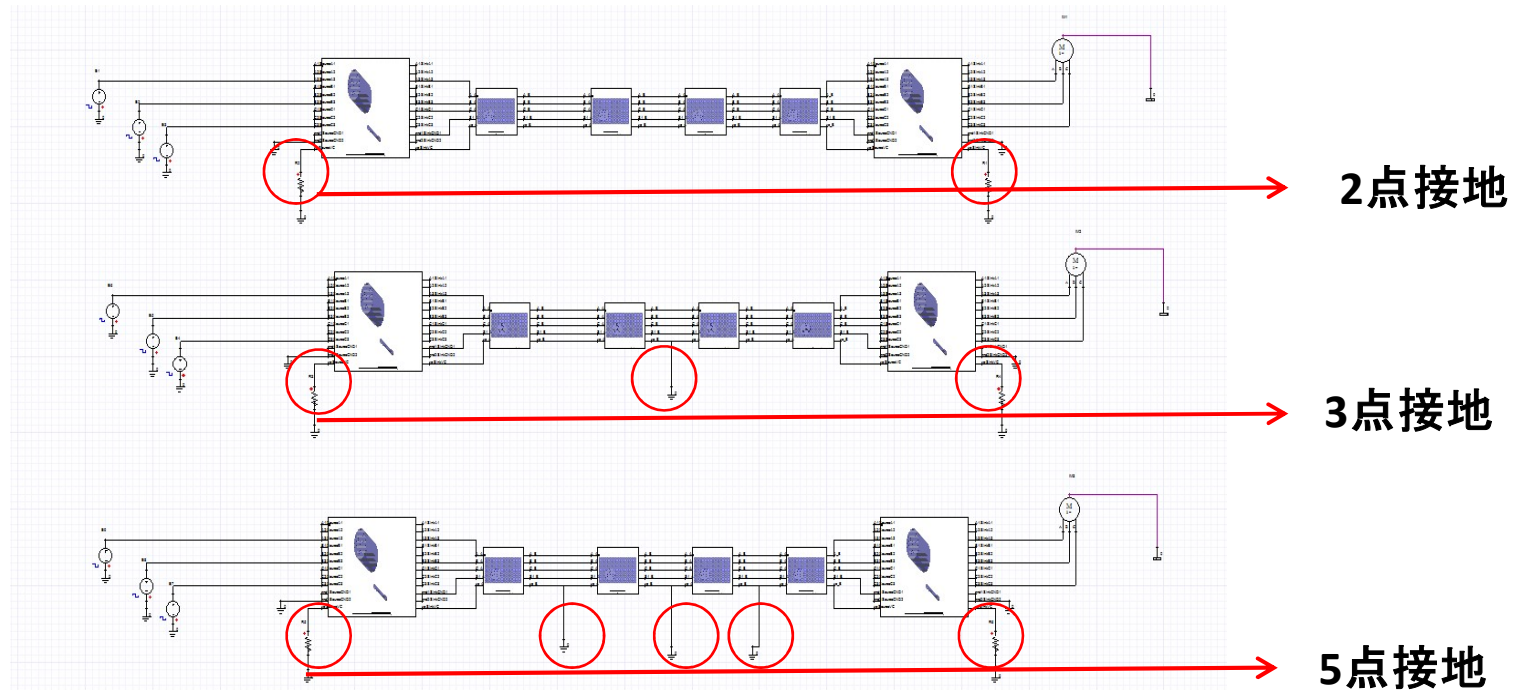


在系统中增加LC滤波器件

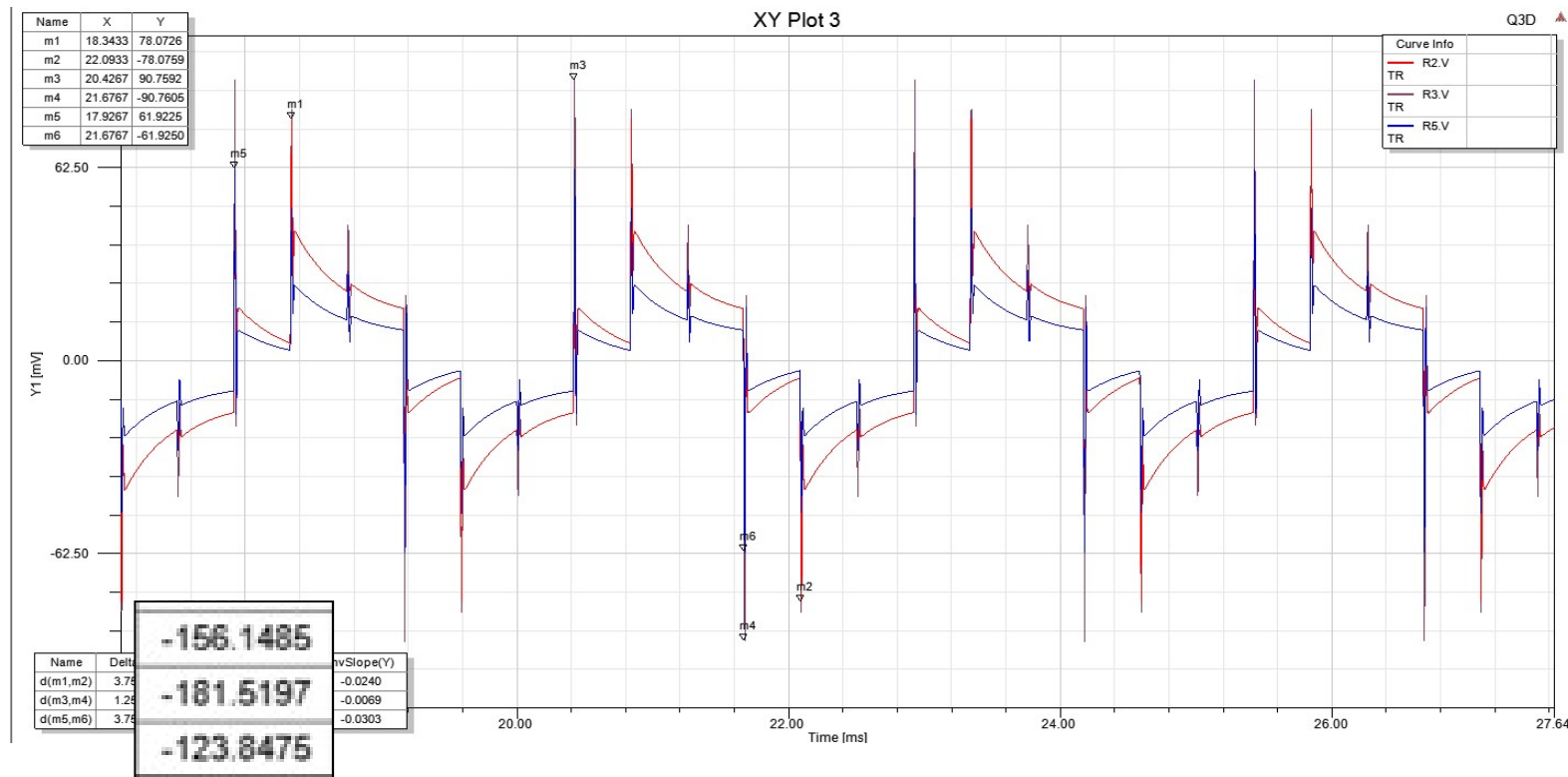
线缆干扰优化---LC滤波



线缆干扰优化---接地点变化



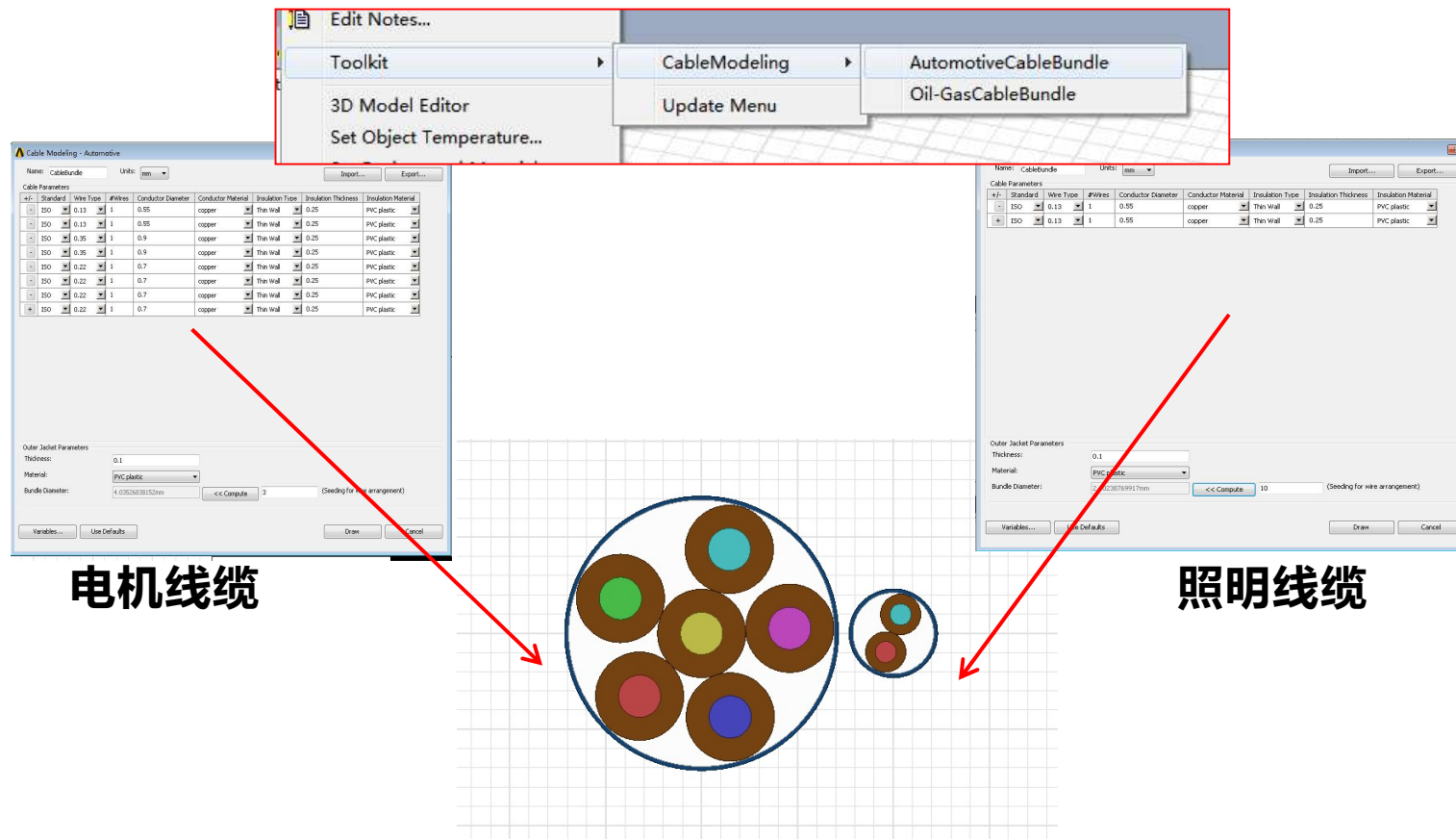
线缆干扰优化---接地点变化



表格中由上至下，分别为2/3/5三种接地方式的噪声波形，5点接地的噪声明显最小。

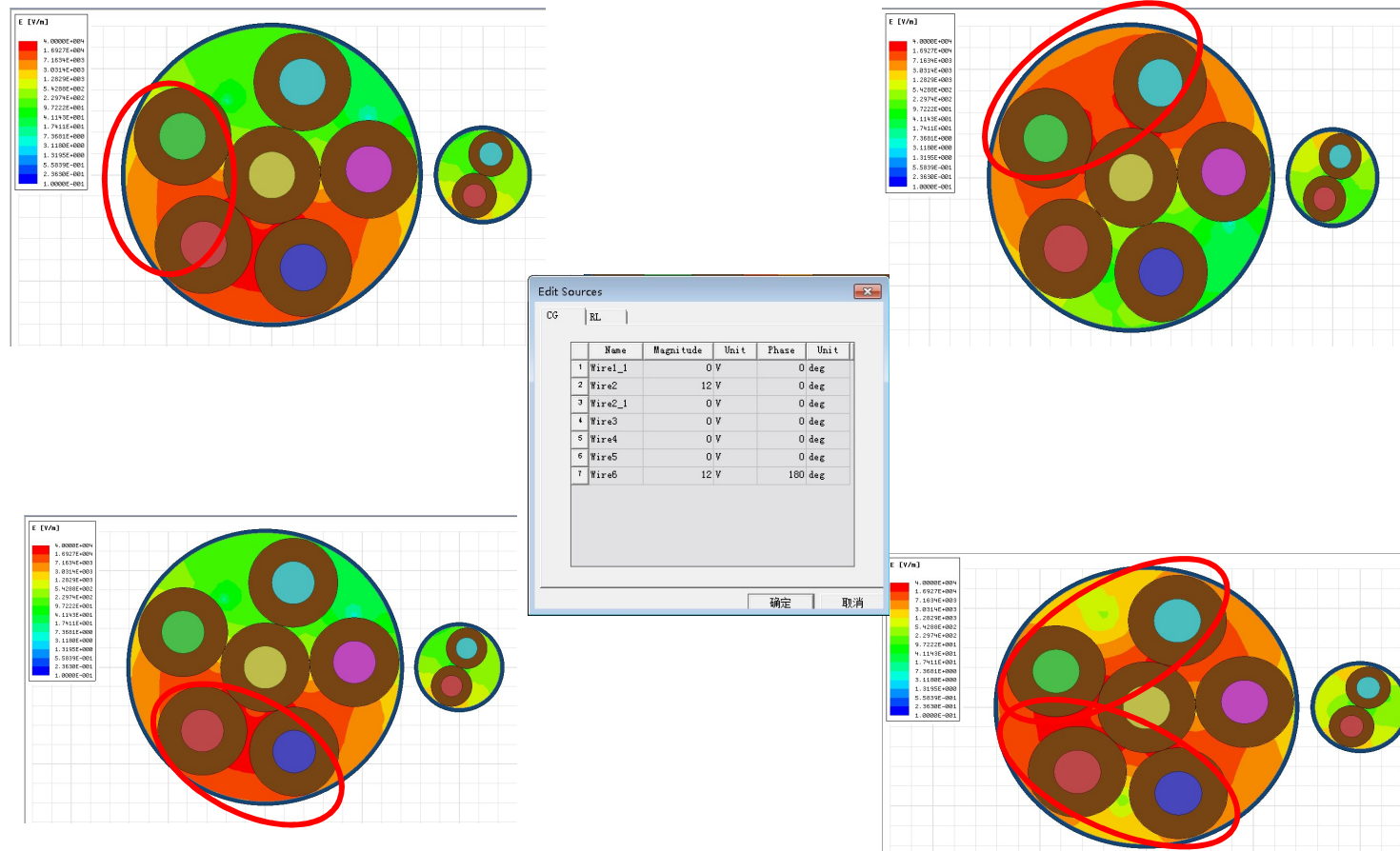
线缆干扰优化---信号分配

ANSYS软件集成的线缆库可快速进行线缆建模，并考虑捆扎效应等影响。

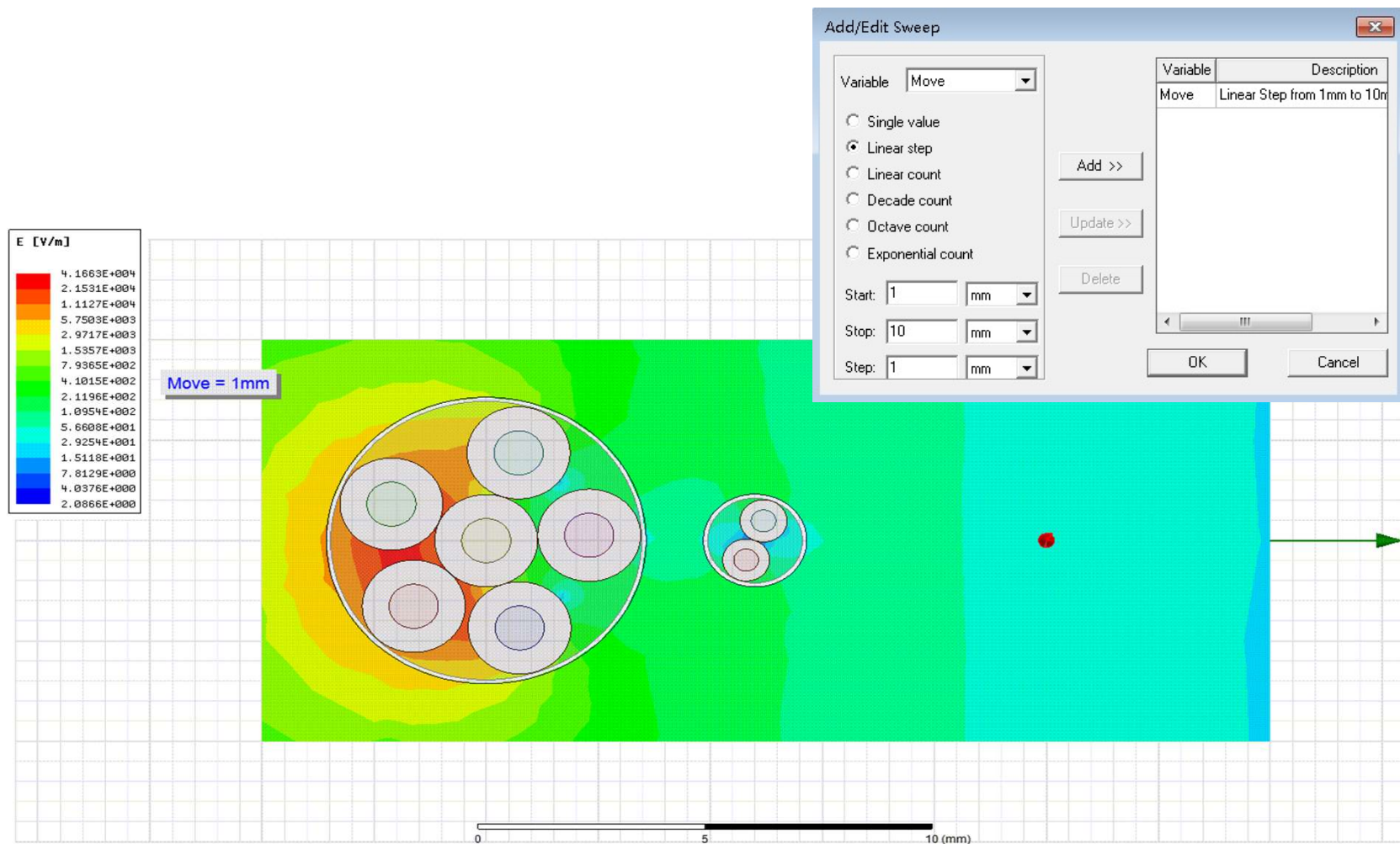


线缆干扰优化---信号分配

不同的线缆分配方式导致的线缆之间的耦合场分布也不同。ANSYS软件只需一次仿真即可得到所有信号分配方式的耦合场。



线缆干扰优化---信号分配



线缆之间的距离变化对耦合场的影响。

车体布局仿真

车体布局仿真---黑盒子仿真

- 具备数据
 - 车体结构
- 获得结果
 - 车体屏蔽效能
 - 布局风险区域

黑盒子

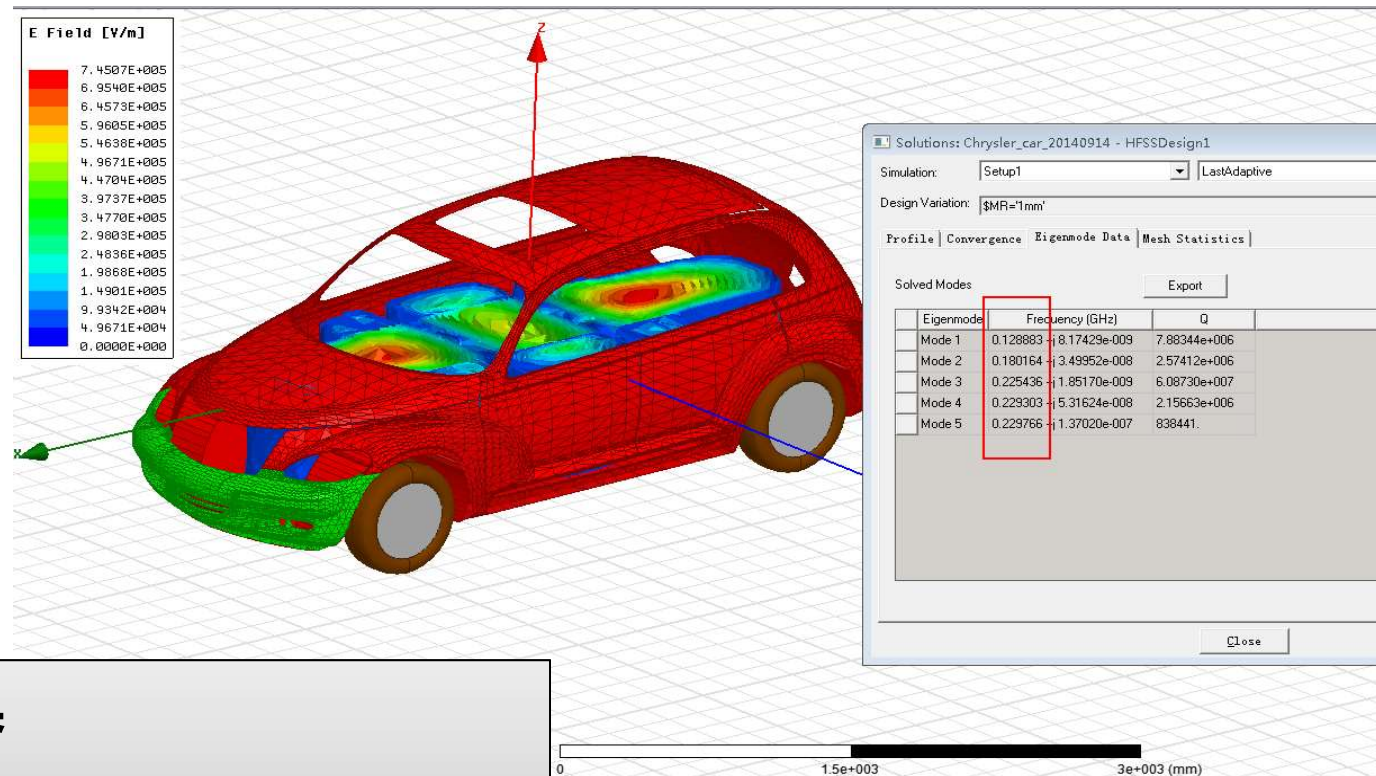
数据全面性：

- 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

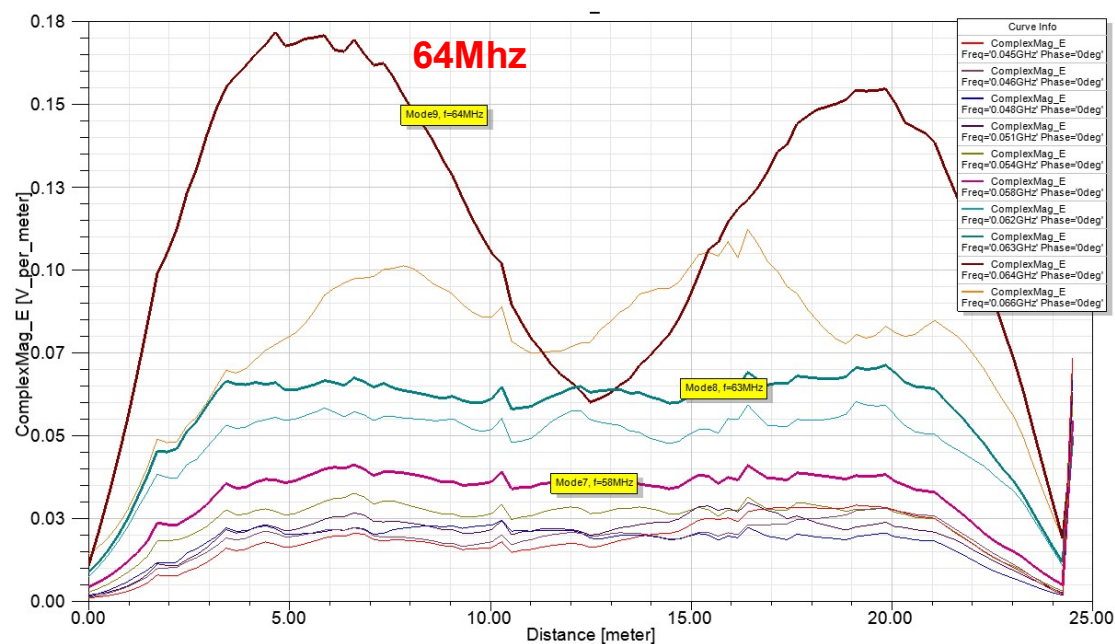
车体布局仿真---谐振分析



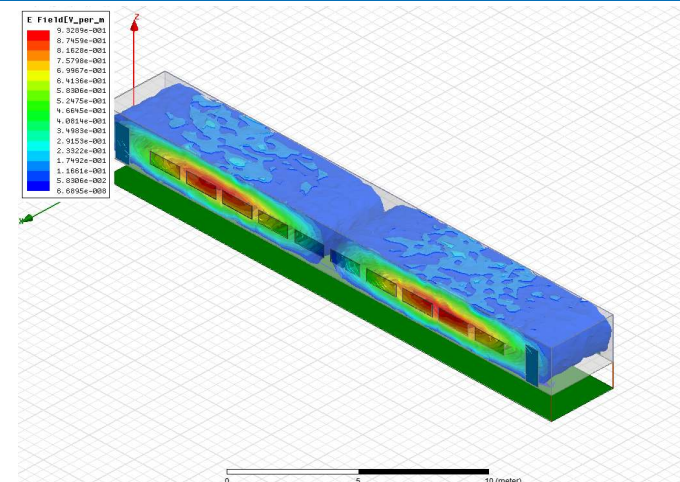
谐振计算结果

- 风险频率
- 布局风险区域

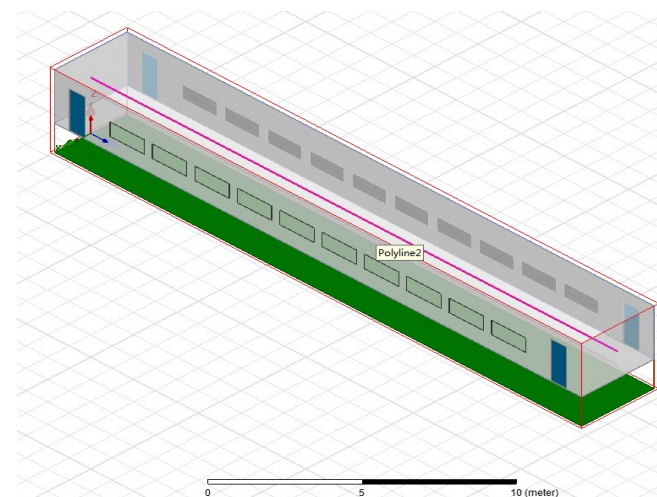
车体谐振与屏蔽效能



多个频点下沿车体长度的屏蔽效能曲线



64MHz谐振场分布



车体内屏蔽效能的观测曲线

车体布局仿真---灰盒子仿真

- 具备数据
 - 车体结构
 - 辐射部件（可选）
- 获得结果
 - 标准部件在车体的辐射场

灰盒子

数据全面性：

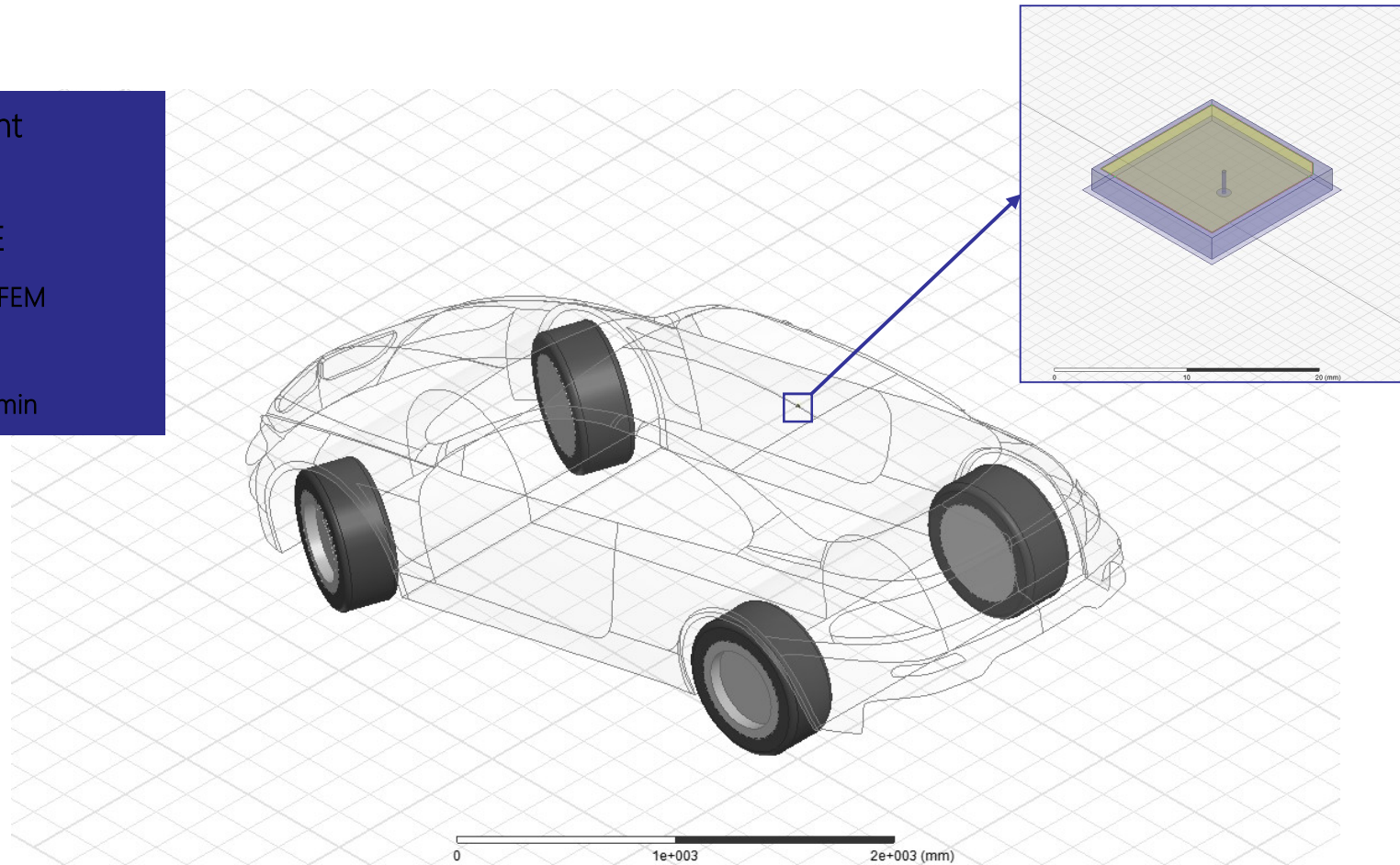
- 具备系统内的部分数据，如关键线缆布局、设备机箱结构；

仿真目的：

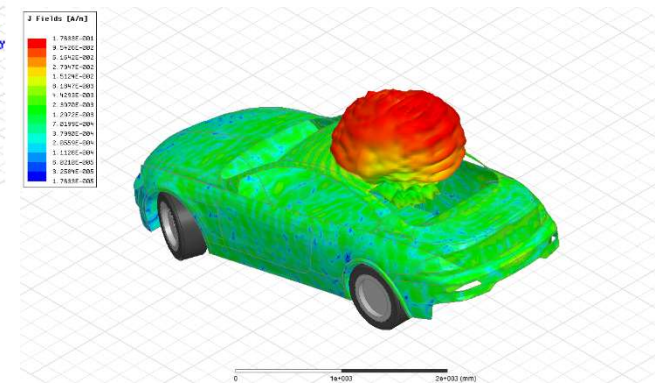
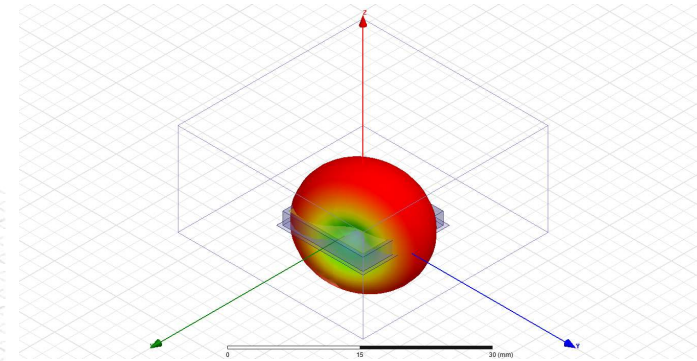
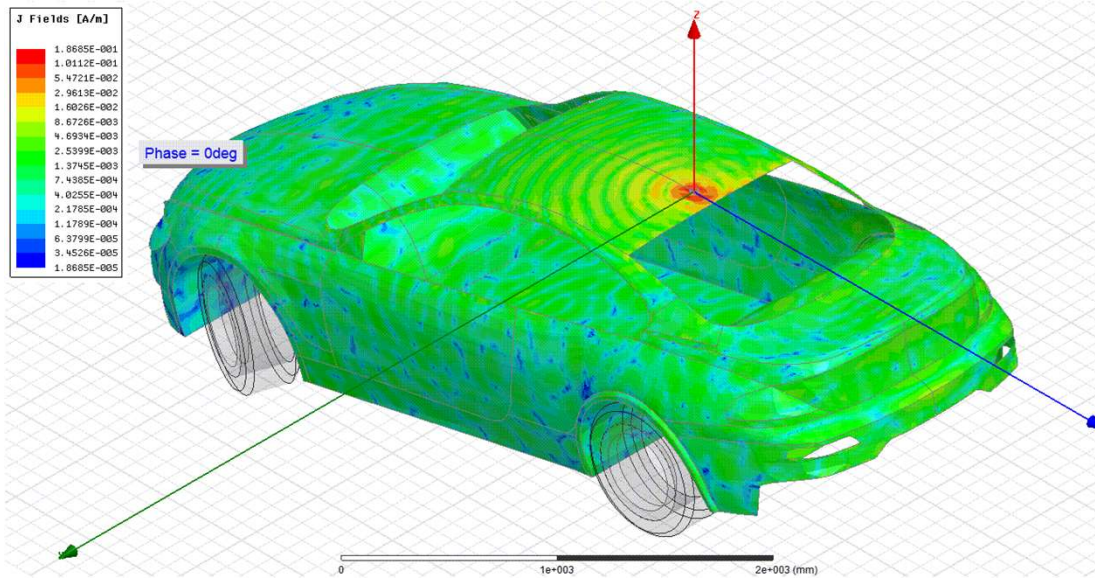
- 关键部件的电磁兼容性分析；
- 系统具体电磁兼容性问题分析与定位；
- 研究设计规则

GPS 天线布局

- 3D Component Assemble
- Hybrid FEM-IE
 - GPS Antenna: FEM
 - Car body: IE
 - Simu time: 20 min



GPS天线布局

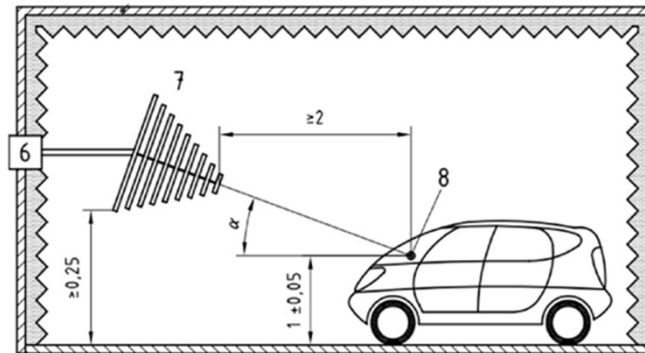


目录

- 1 汽车电磁兼容设计挑战
- 2 ANSYS 汽车兼容仿真思路
- 3 ANSYS 汽车电磁兼容仿真设计案例
- 4 ANSYS 汽车电磁兼容虚拟测试验证
- 5 总结

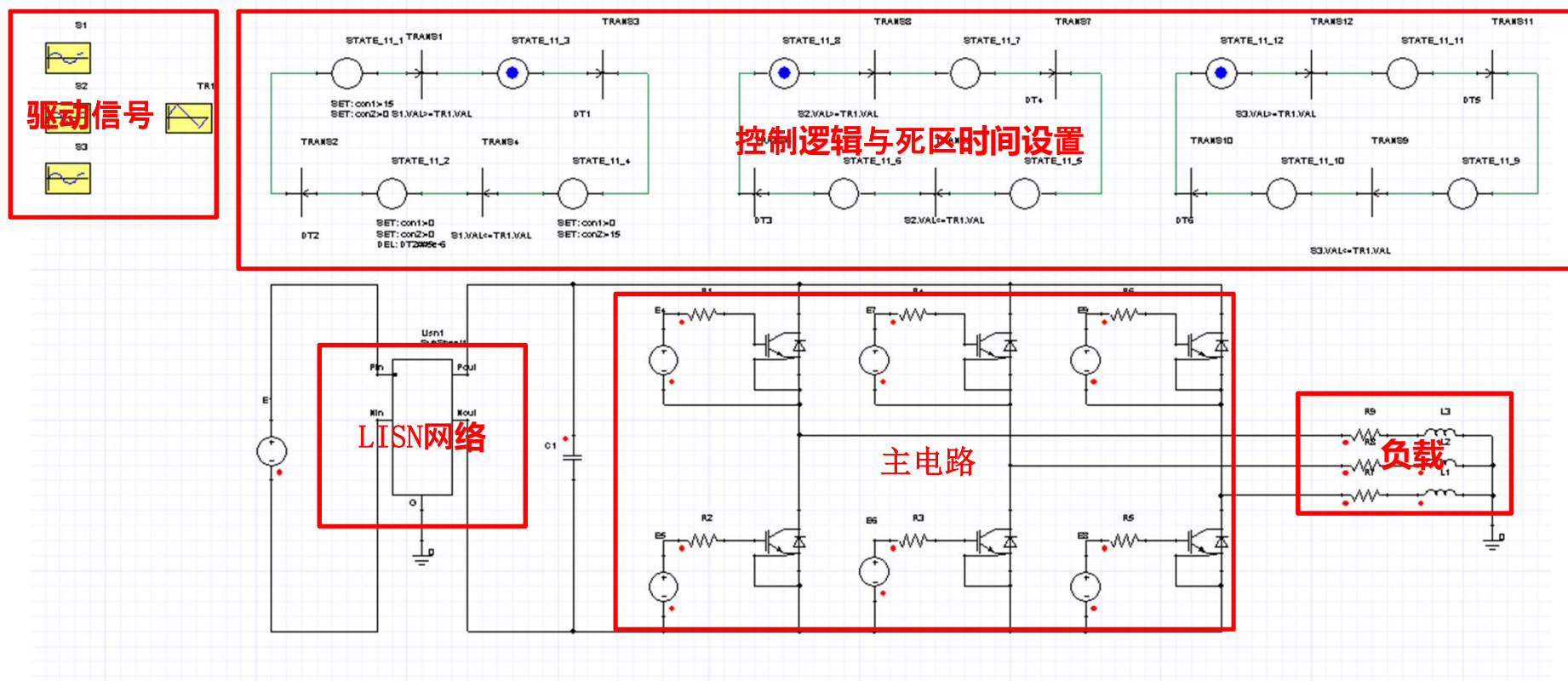
整车EMC虚拟测试

- CE传导测试
- RE辐射测试
- RS干扰测试
- ESD静电测试
- BCI大电流注入测试



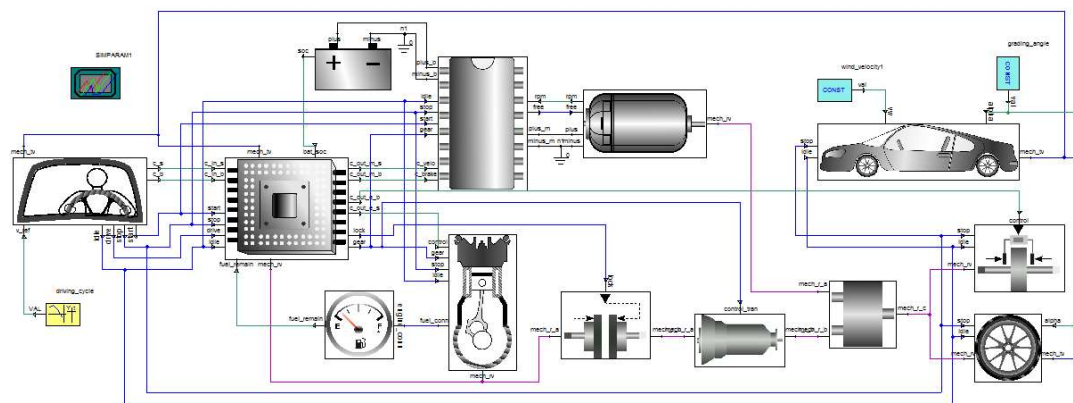
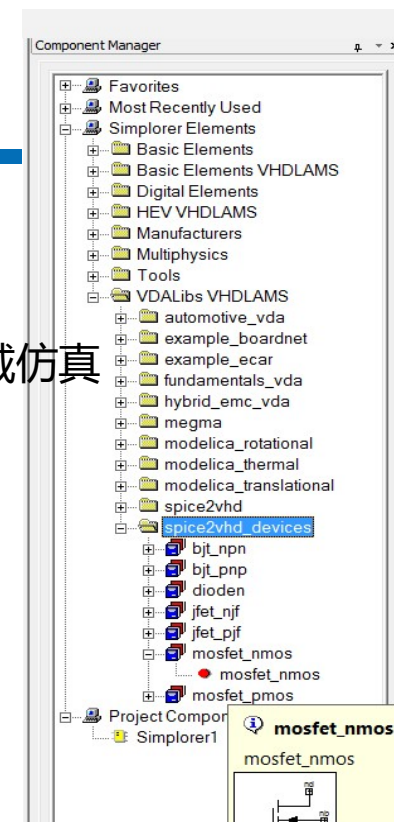
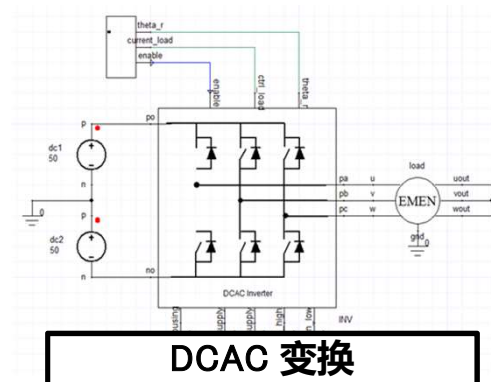
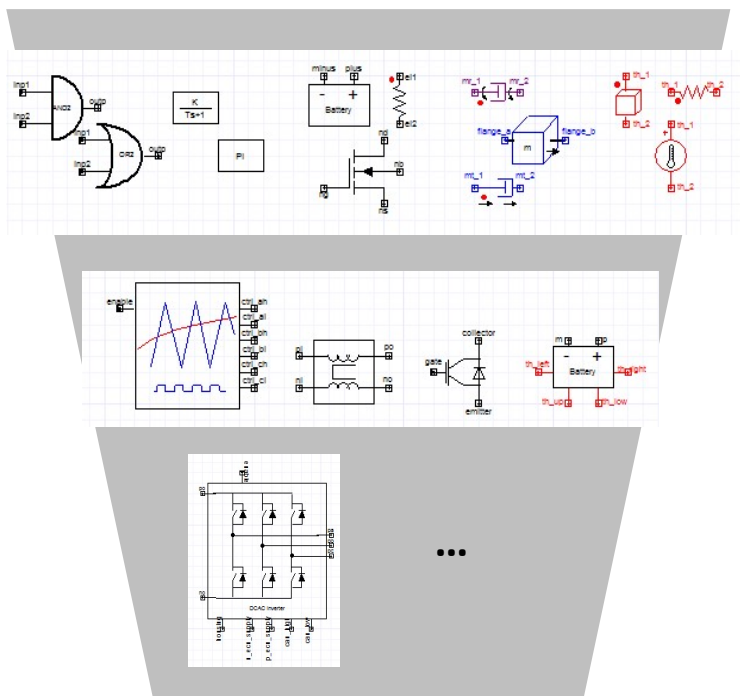
变流器CE传导分析

1.理想电路模型

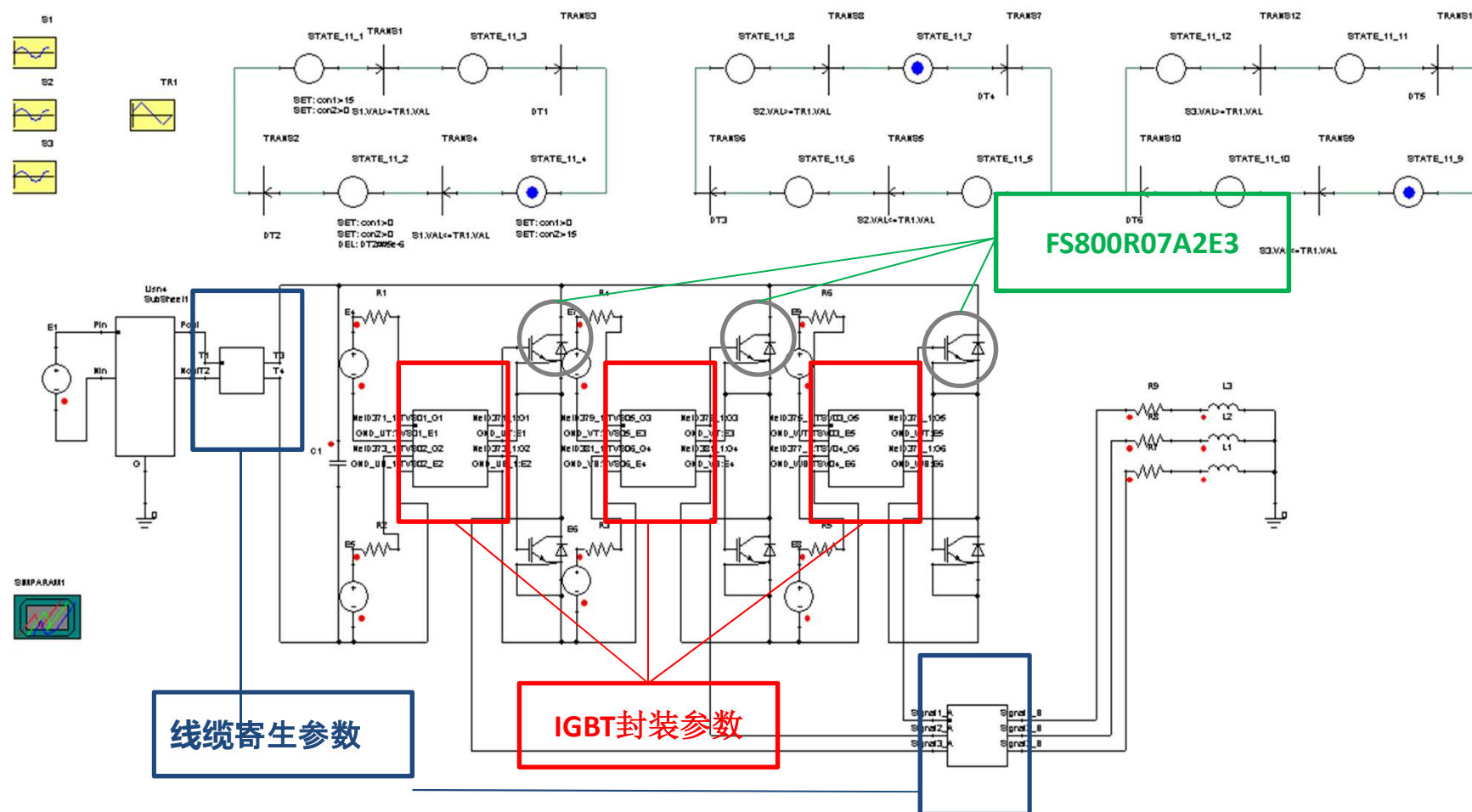


专业汽车模型库

- 500+ 汽车/控制模型库，以及详细的器件应用手册
- 专业器件模型库（动态模型，精度远高于SPICE模型）
- 约400 EV/HEV相关的 VHDL-AMS 模型，可进行混合信号、多物理域仿真

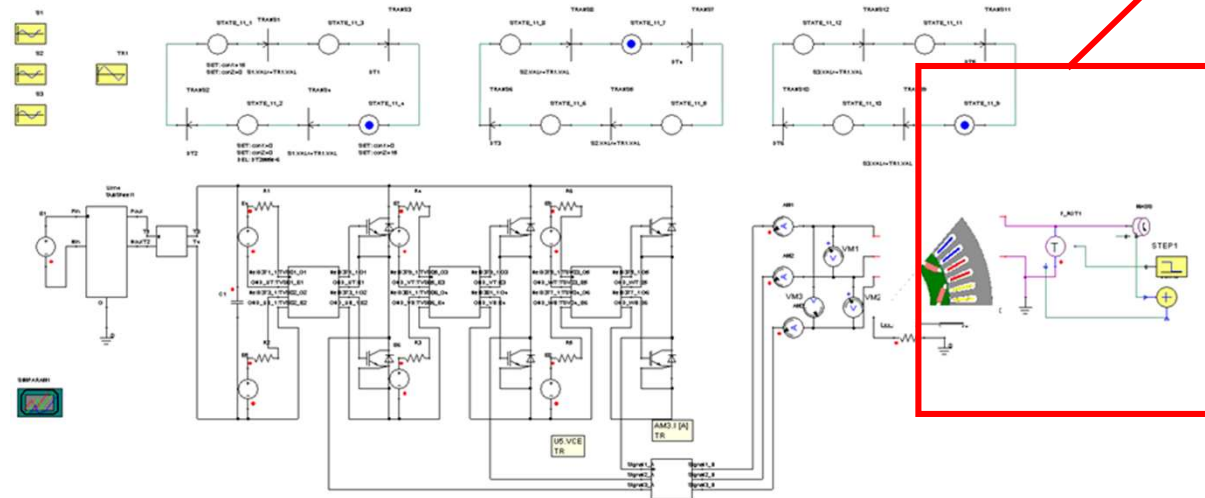


2.集成IGBT/寄生参数电路模型EMC特性

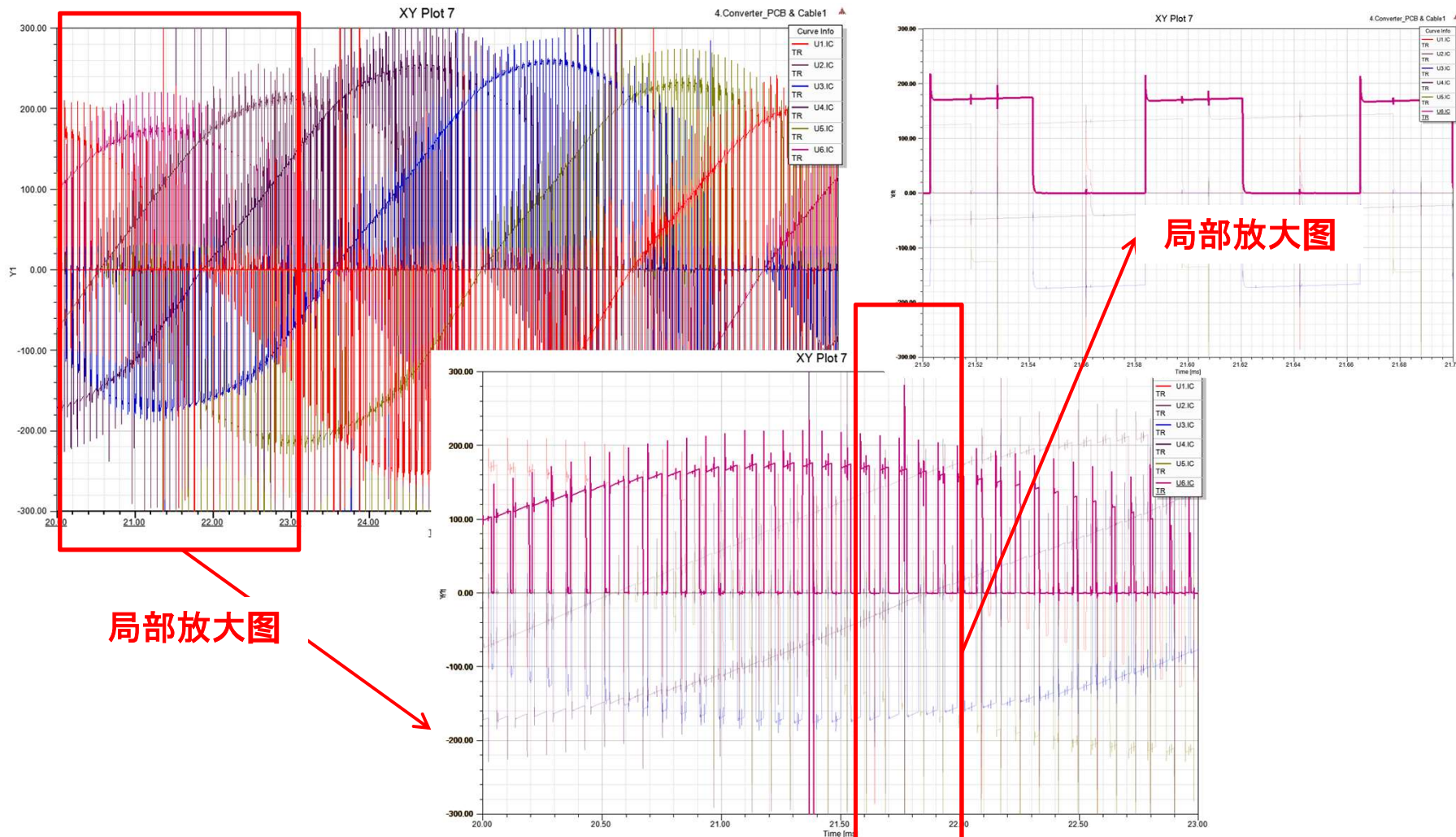


3.集成物理原型级电机电路模型

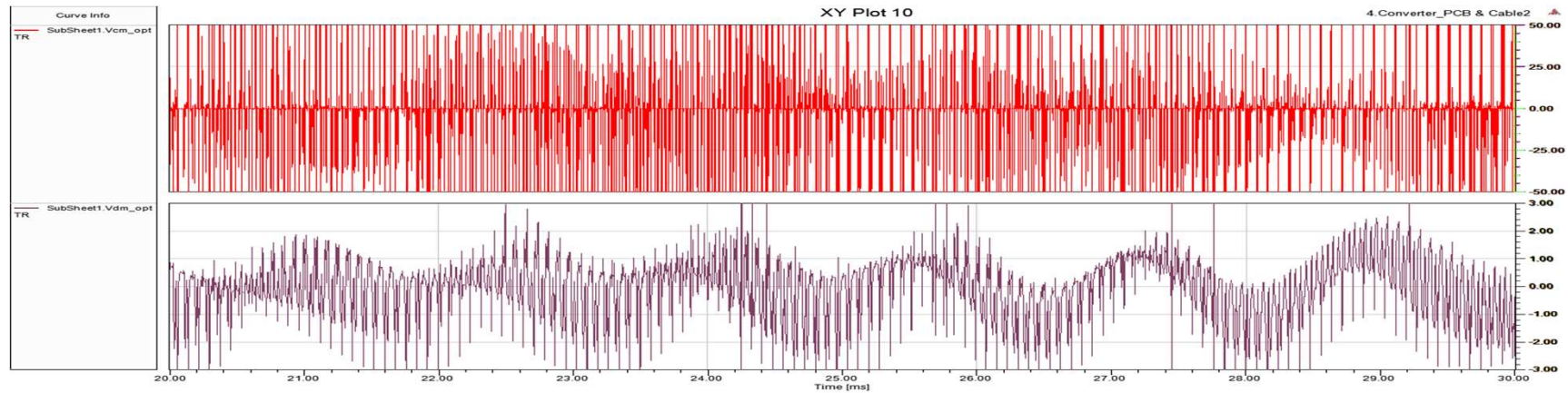
Prius IPM电机



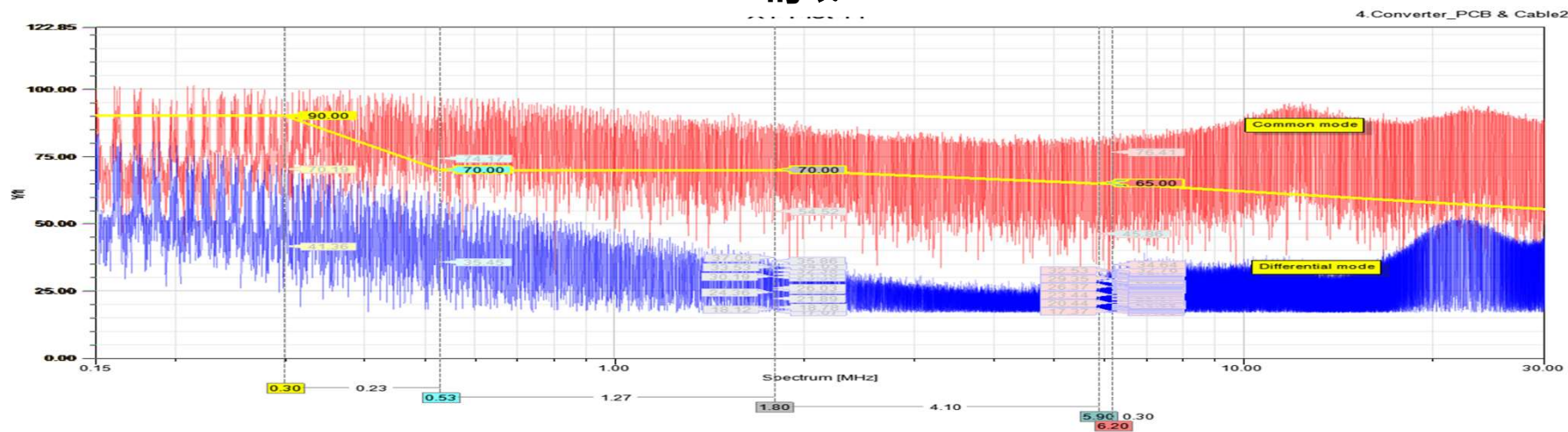
IGBT的 I_c 稳态电流波形



差模、共模干扰时域、频域结果



时域



频域

RE辐射分析

RE辐射测试标准

COMMISSION
ELECTROTECHNIQUE
INTERNATIONALE

**CISPR
25**

INTERNATIONAL
ELECTROTECHNICAL
COMMISSION

Deuxième édition
Second edition
2002-08

COMITÉ INTERNATIONAL SPÉCIAL DES PERTURBATIONS RADIOÉLECTRIQUES
INTERNATIONAL SPECIAL COMMITTEE ON RADIO INTERFERENCE

**Caractéristiques des perturbations
radioélectriques pour la protection des
récepteurs utilisés à bord des véhicules,
des bateaux et des engins –
Limites et méthodes de mesure**

**Radio disturbance characteristics for the
protection of receivers used on board vehicles,
boats, and on devices –
Limits and methods of measurement**

INTERNATIONAL
STANDARD

**ISO
11451-3**

Second edition
2007-07-01

**Road vehicles — Vehicle test methods for
electrical disturbances from narrowband
radiated electromagnetic energy —**

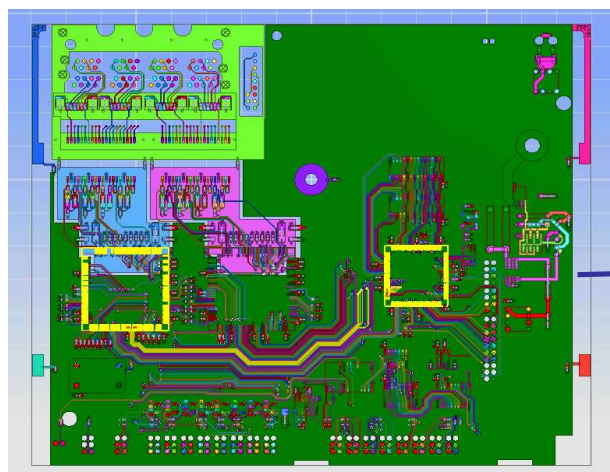
Part 3:
On-board transmitter simulation

*Véhicules routiers — Méthodes d'essai d'un véhicule soumis à des
perturbations électriques par rayonnement d'énergie électromagnétique
en bande étroite —*

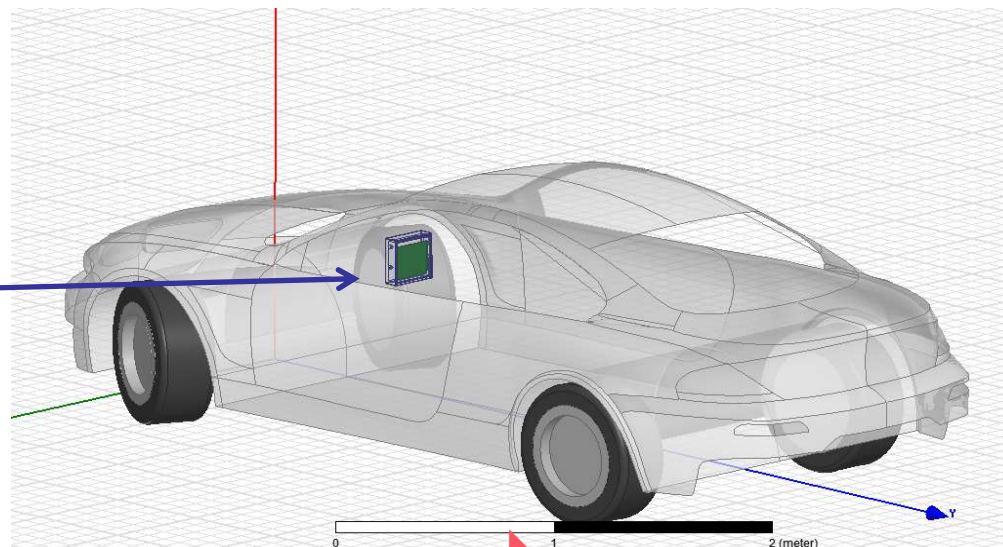
Partie 3: Simulation des émetteurs embarqués

RE辐射测试仿真---白盒子分析

当数字PCB工作时，测试整车的对外辐射。



数字ECU PCB



PCB辐射仿真

整车EMC辐射分析

EMC标准比对

RE辐射测试仿真---白盒子分析

- 具备数据
 - 车体结构
 - 车载PCB设计文件
 - 车载设备机箱设计文件
 - 芯片模型
- 获得结果
 - 车载PCB工作时的，整车的RE辐射曲线

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：

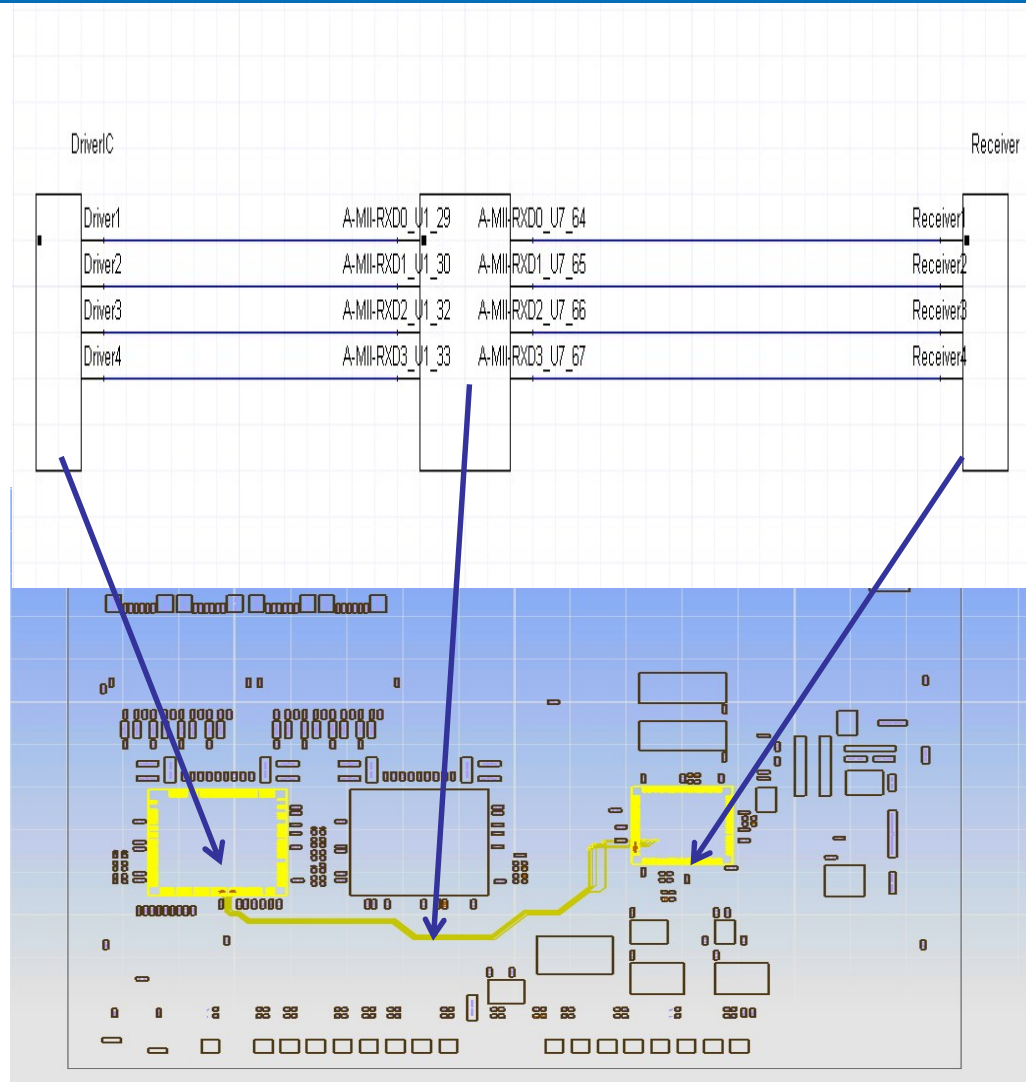
- 全面分析和预测系统电磁兼容性；
- 搭建系统电磁兼容性设计流程；
- 研究设计规则

PCB辐射仿真

整车EMC辐射分析

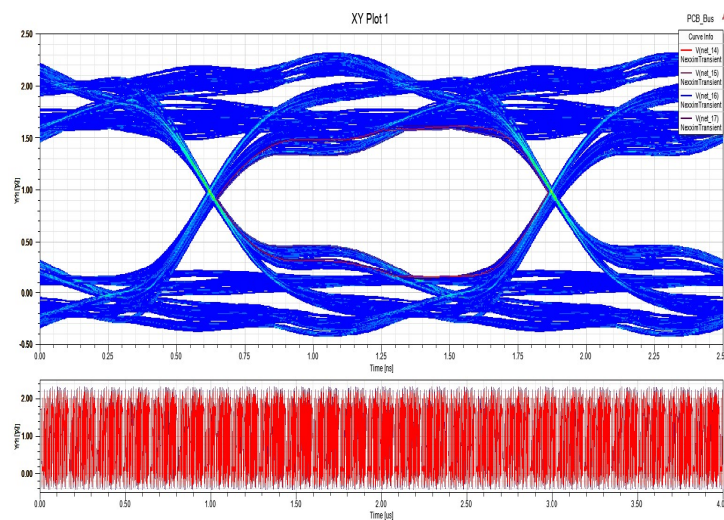
EMC标准比对

RE辐射测试仿真---PCB数字信号计算

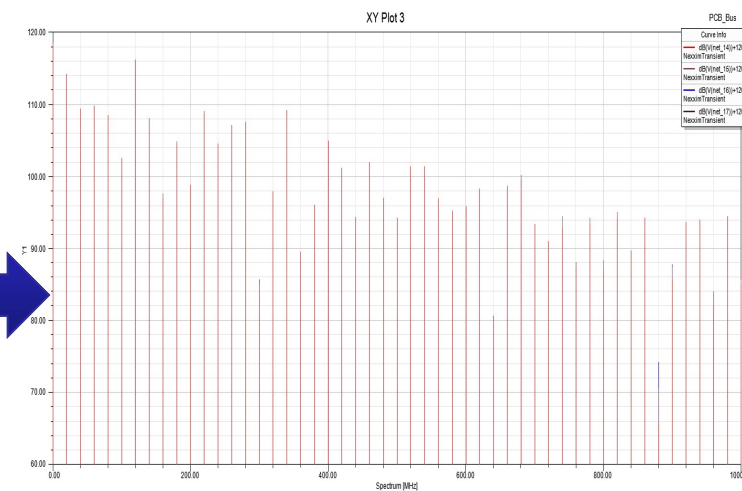


ANSYS仿真平台可将芯片模型与PCB模型互连，完整模拟数字信号的传输过程。

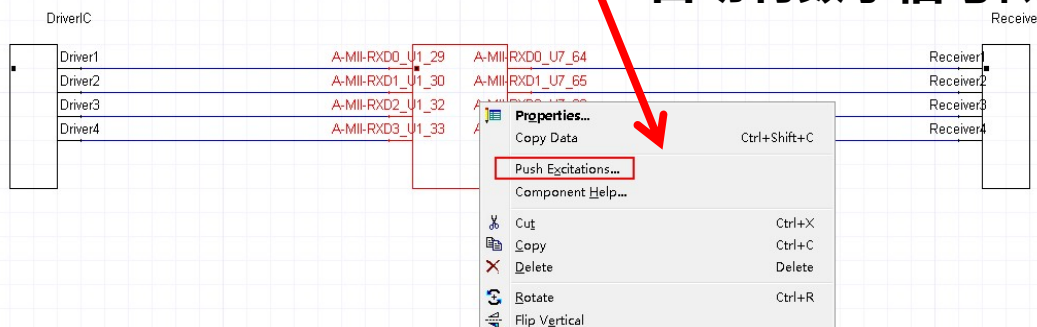
RE辐射测试仿真---PCB数字信号仿真结果



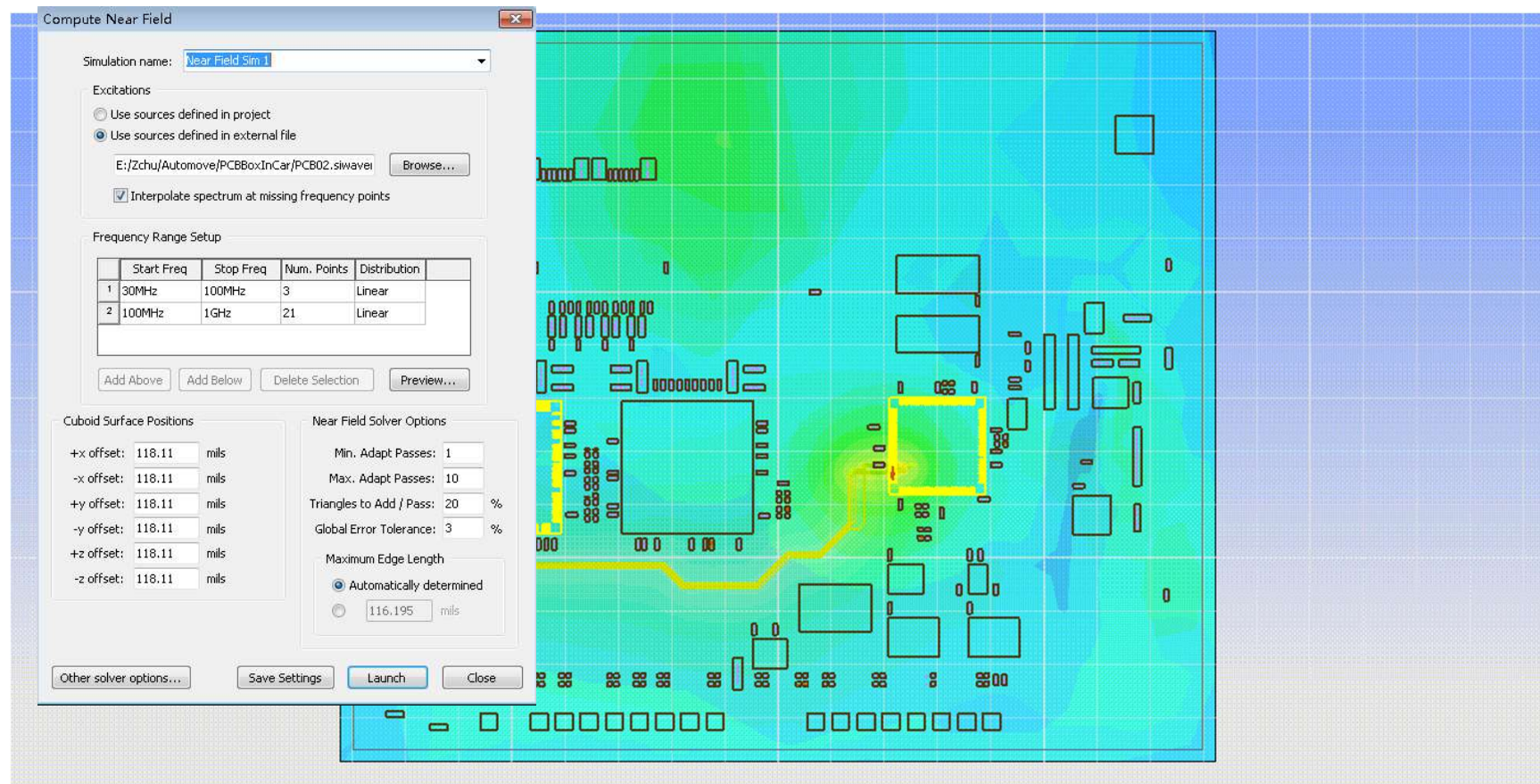
FFT



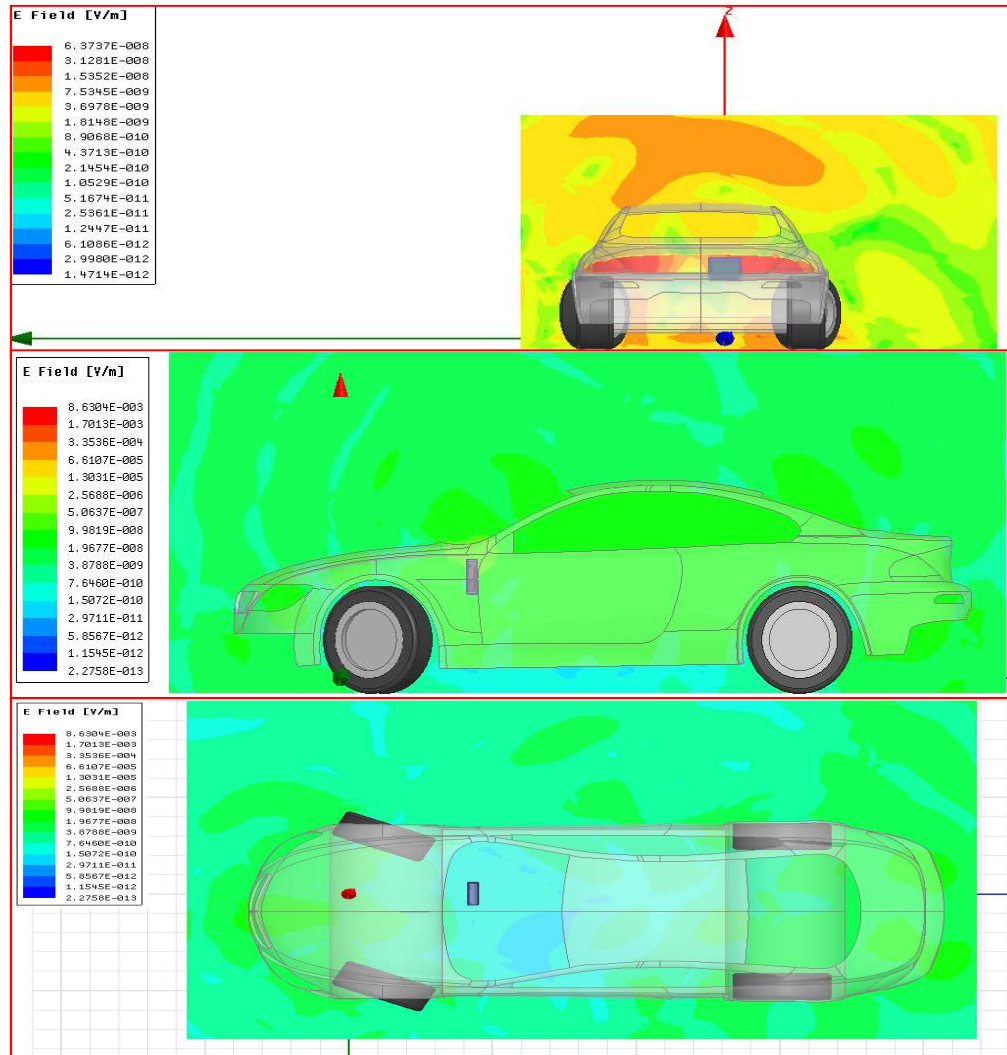
自动将数字信号做为激励源回推至PCB



RE辐射测试仿真---PCB辐射仿真结果



RE辐射测试仿真---整车EMC辐射



XZ 平面电场

YZ平面电场

XY平面电场

RE辐射测试仿真---整车EMC辐射曲线

Table 5 – Limits of disturbance – Complete vehicle

Service/Band ^a	Frequency MHz	Terminal disturbance voltage at receiver antenna terminal dB(μV)				
		Broadband continuous		Broadband short duration		Narrowband
		Quasi-peak	Peak	Quasi-peak	Peak	Peak
Broadcast						
LW	0,15 to 0,30	9	22	15	28	6
MW	0,53 to 2,0	6	19	15	28	0
SW	5,9 to 6,2	6	19	6	19	0
VHF	76 to 108	6(15 *)	28	15	28	6
Mobile services						
VHF	30 to 54	6(15 *)	28	15	28	0
VHF	68 to 87	6(15 *)	28	15	28	0
VHF	142 to 175	6(15 *)	28	15	28	0
UHF	380 to 512	6(15 *)	28	15	28	0
UHF	820 to 960	6(15 *)	28	15	28	0

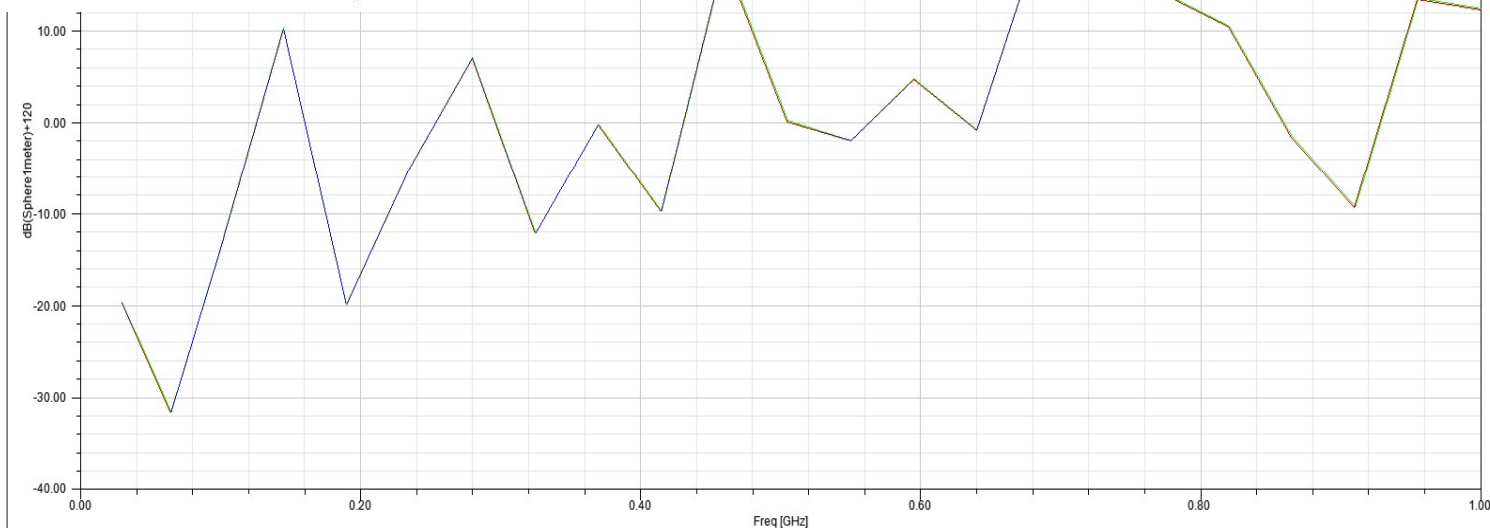
^a Limit for ignition systems only.
^b LW: Long wave, MW: Medium wave, SW: Short wave (amplitude modulation, AM)
VHF: Very high frequency, UHF: Ultra high frequency (frequency modulation, FM)

NOTE 1 All broadband values listed in this table are valid for the bandwidths specified in table 3.
NOTE 2 Stereo signals may be more susceptible to disturbance than monaural signals in the FM broadcast band. This phenomenon has been factored into the VHF (76 MHz to 108 MHz) limit.
NOTE 3 When possible it may be advisable to switch broadband only disturbance sources off for the measurement of narrowband disturbance.

CISPR SPEC

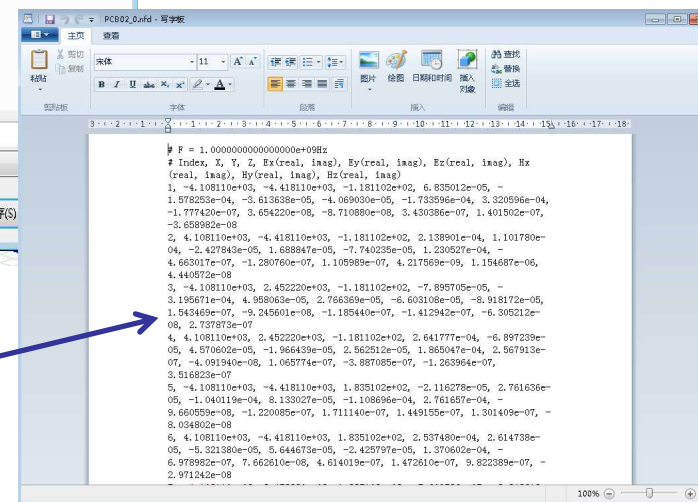
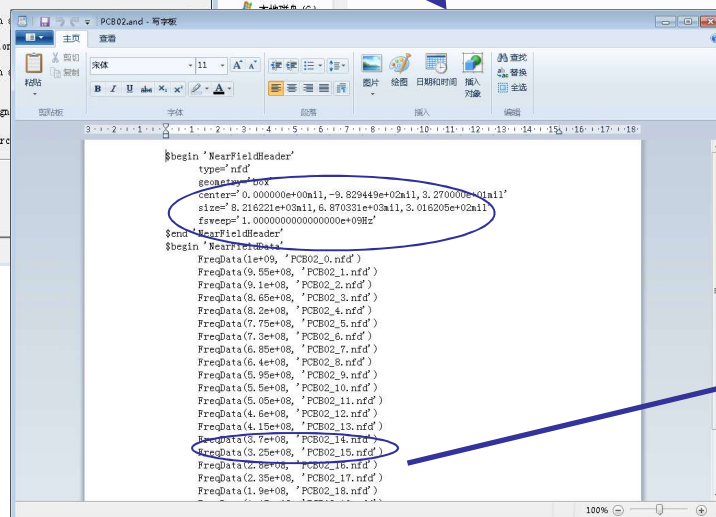
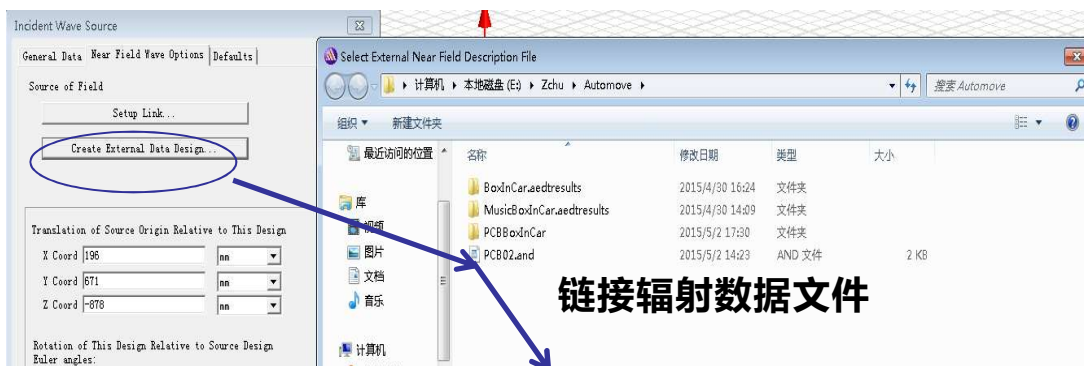
XY Plot 1

BoxInCar

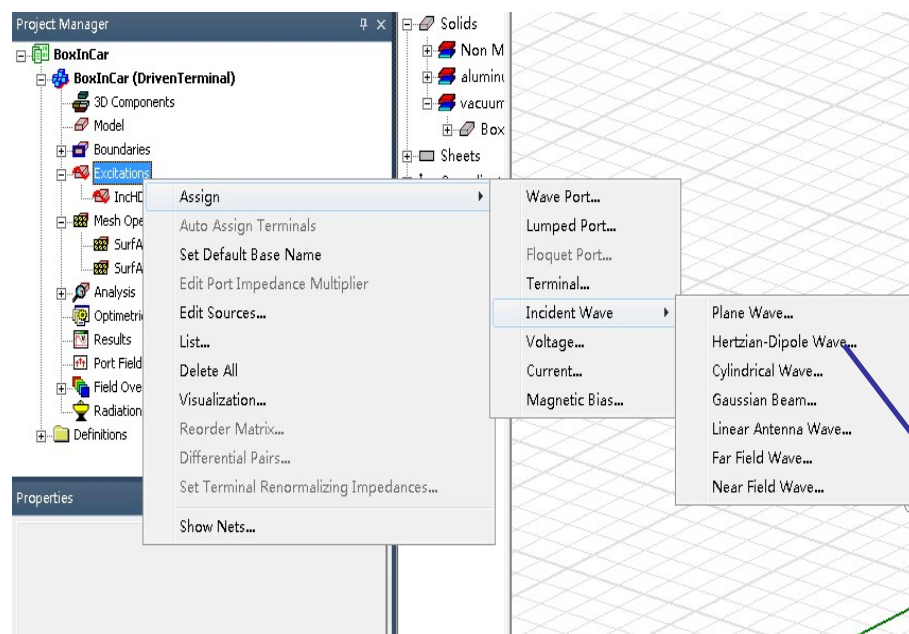


RE辐射测试仿真---灰盒子分析

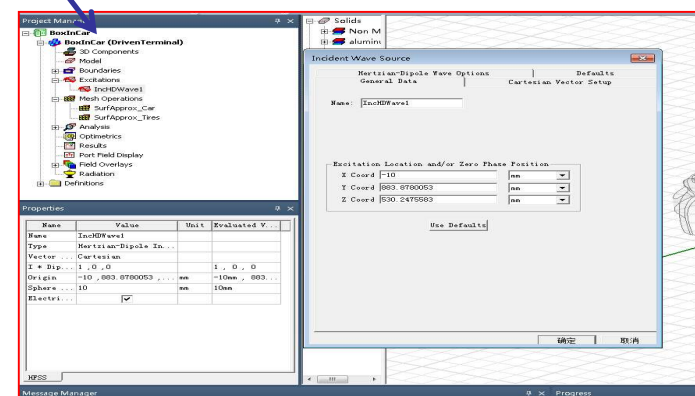
- 如果没有PCB设计数据，
可以链接辐射场数据文件。
- 文件可以由其他软件导出，
也可以由量测获得。



RE辐射测试仿真---黑盒子分析



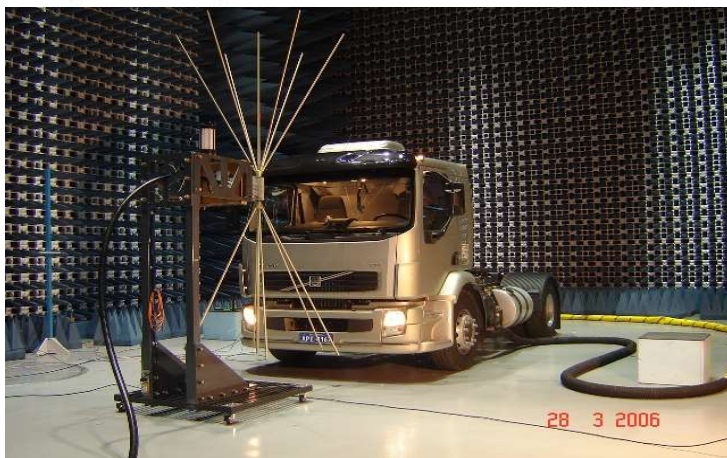
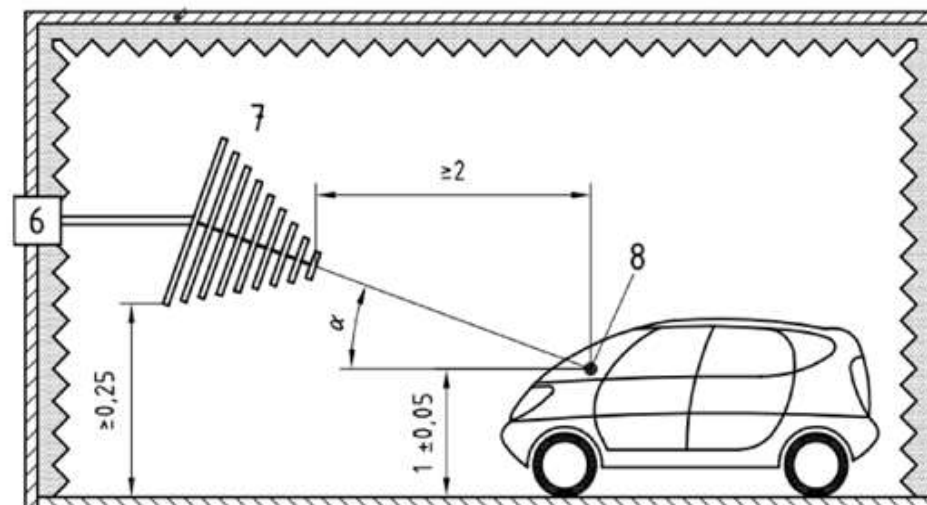
如果没有任何的辐射部件作息
，可在ANSYS软件中直接
添加平面波等标准激励进
行分析。



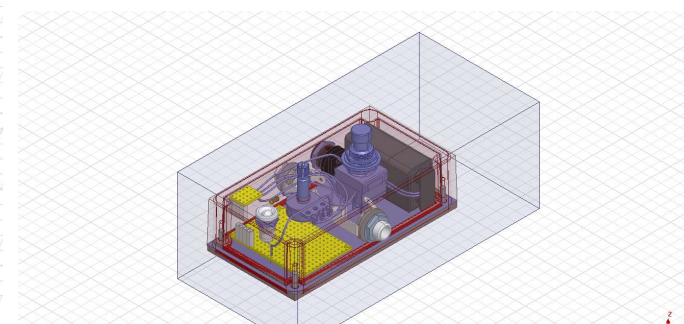
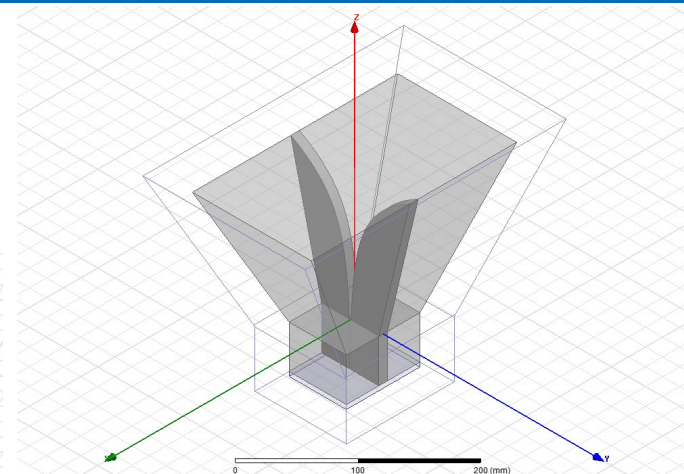
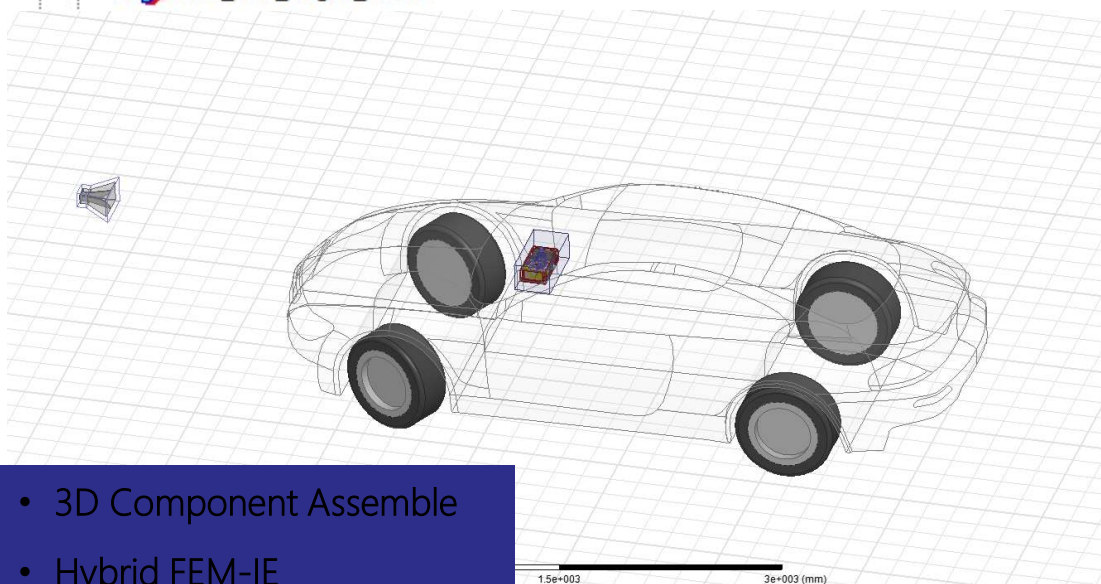
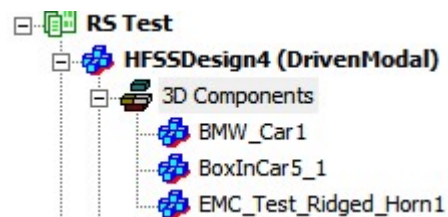
RS抗干扰测试

ISO 11451-2

This part of ISO 11451 specifies a vehicle test method for determining the immunity of passenger cars and commercial vehicles to electrical disturbances from off-vehicle radiation sources, regardless of the vehicle propulsion system (e.g. spark-ignition engine, diesel engine, electric motor). It can also be readily applied to other types of vehicles. The electromagnetic disturbances considered are limited to narrowband electromagnetic fields. Different numerical approaches are going to be presented in order to show how HFSS can be used to virtually test any vehicle under ISO 11451 standard.



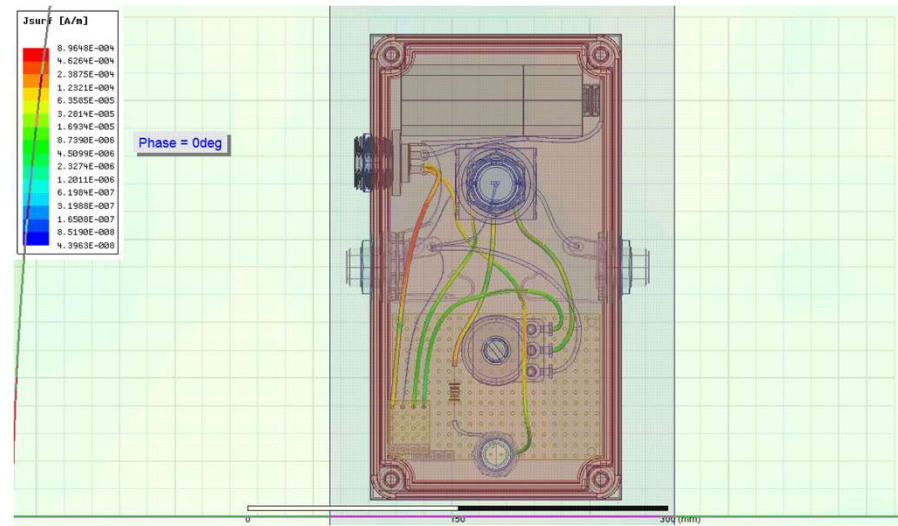
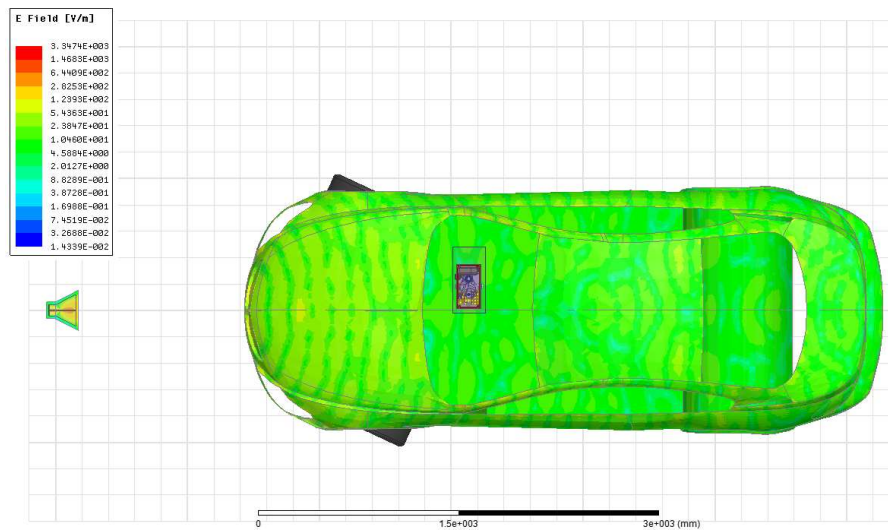
RS抗干扰虚拟测试



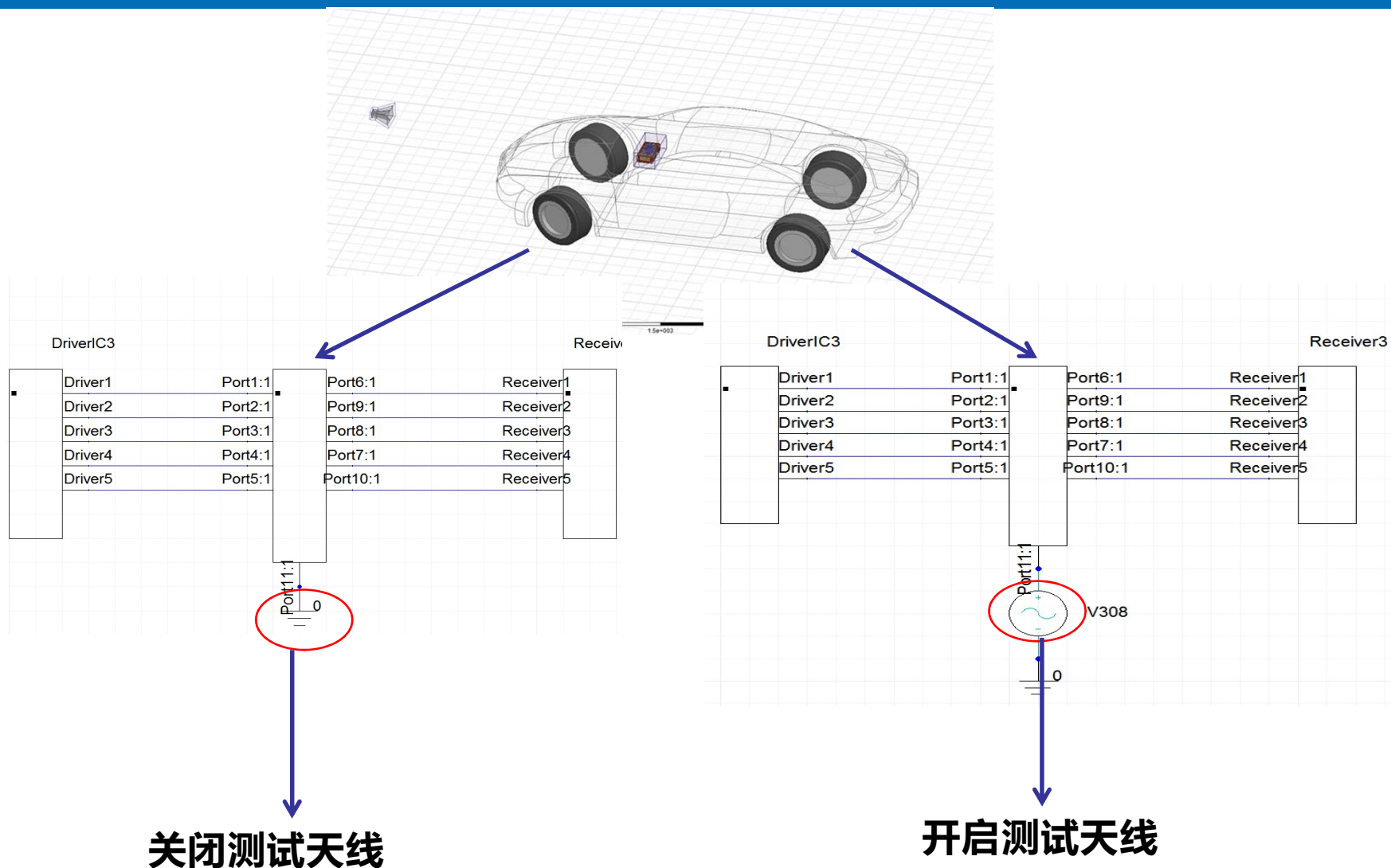
- 3D Component Assemble
- Hybrid FEM-IE
 - GPS Antenna: FEM
 - Car body: IE
 - Last Adaptive time: 9 min

Adaptive Pass 6				Frequency: 1 GHz
Mesh (volume, adaptive)	00:00:01	00:00:01	37.9 M	9830 tetrahedra
Mesh (volume, adaptive)	00:00:11	00:00:11	141 M	84135 tetrahedra
Mesh Assembler	00:00:07	00:00:07	144 M	46395 tri + 76847 tets
Domain Partitioning	00:00:14	00:00:14	288 M	Disk = 2130 KBytes, 8726 tetrahedra 63982 tetrahedra , 4 domains
Matrix Assembly/Solver MCS16, Dom1	00:00:03	00:00:06	369 M	Disk = 0 KBytes, 8726 tetrahedra , EMC_Test_Ridged_Horn1_1: 105 triangles matrix size 53417 , matrix bandwidth 20.7 , Average Order 0.957483
Matrix Assembly/Solver MCS16, Dom2	00:00:22	00:01:44	2.11 G	Disk = 1 KBytes, 63982 tetrahedra , BoxInCar5_1_10: 30 triangles , BoxInCar5_1_9: 26 triangles , BoxInCar5_1_8: 30 triangles , BoxInCar5_1_7: 29 triangles
Matrix Assembly/Solver DCS16, IE, Dom3	00:02:41	00:31:12	6.01 G	Disk = 1087 KBytes, 46395 triangles, matrix size 68912, ACA solver
Matrix Assembly/Solver DCS16, BI, Dom4	00:00:00	00:00:07	6.01 G	Disk = 27 KBytes, 992 triangles, matrix size 2376, ACA solver
Iterations	00:06:06	00:18:15	10.2 G	Disk = 135261 KBytes, total matrix size 447439, average 12.6 iterations per excitation, 11 excitation(s), 16 core(s)
Adaptive Passes converged				

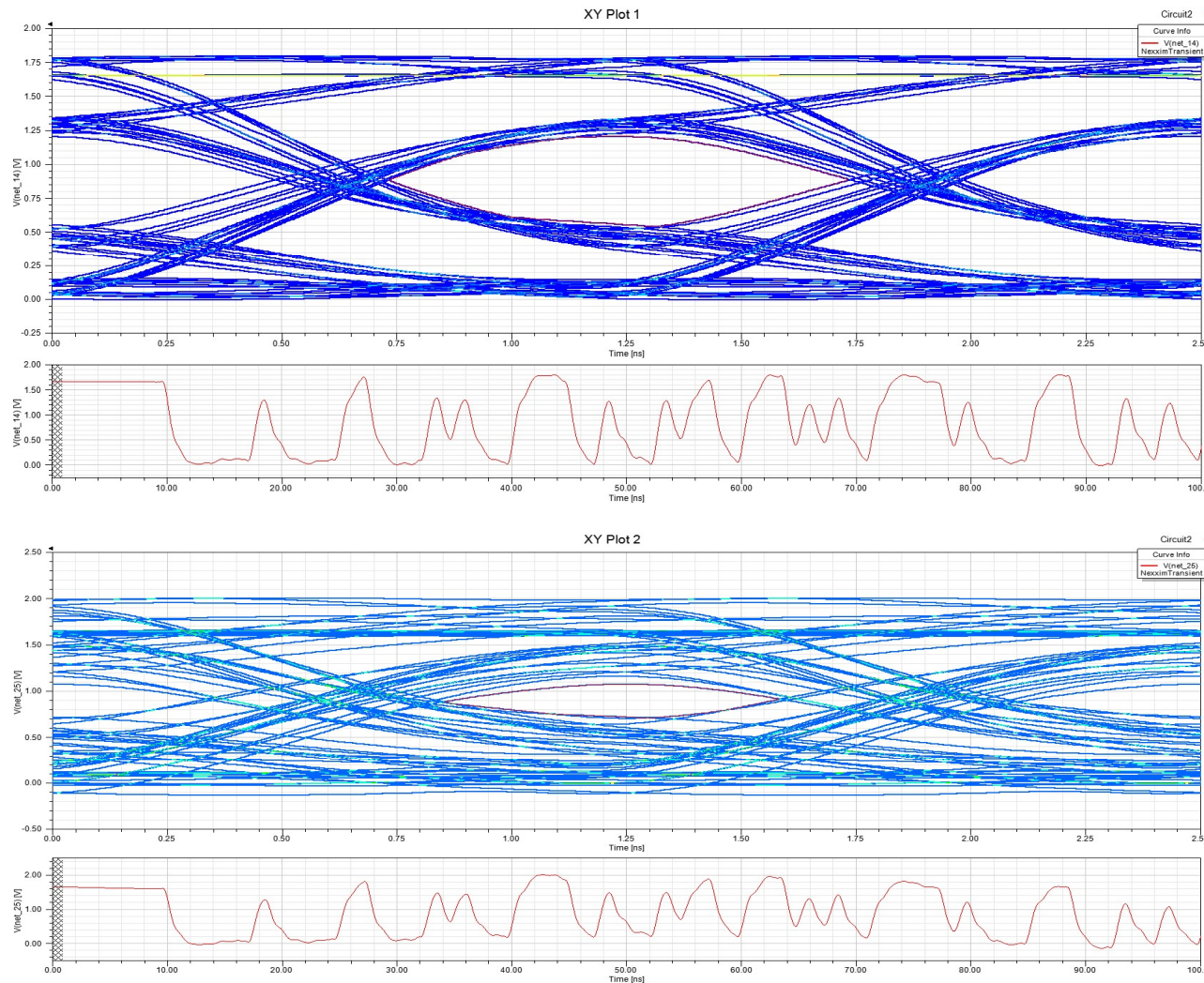
RS抗干扰虚拟测试结果



车载数字设备噪声分析



车载数字设备噪声分析



测试天线关闭时，车载数字设备的眼图张开良好，可以正常工作。

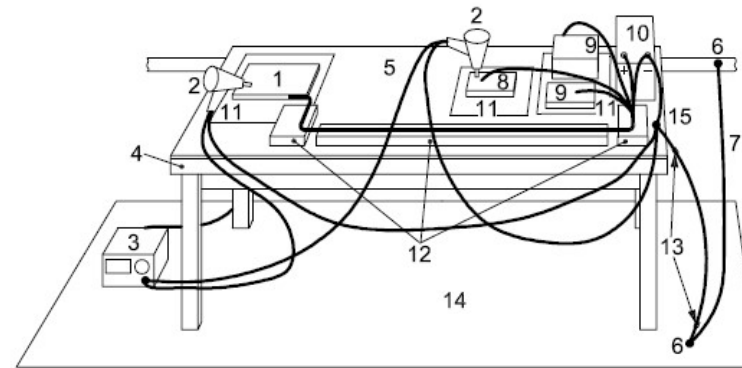
测试天线开启后，车载数字设备的眼图明显闭合，无法正常工作。

ESD测试仿真

INTERNATIONAL
STANDARD

ISO
10605

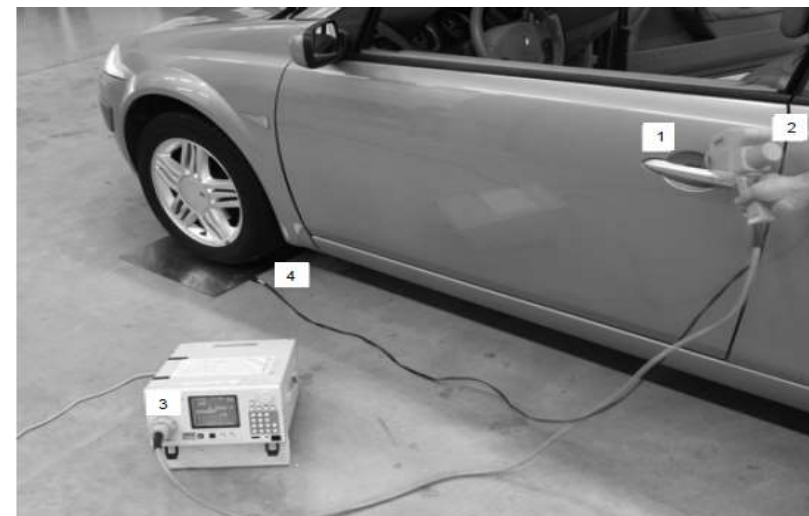
Second edition
2008-07-15



部件测试

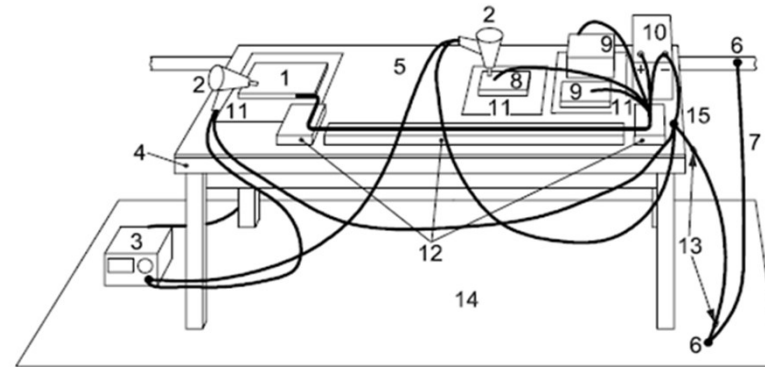
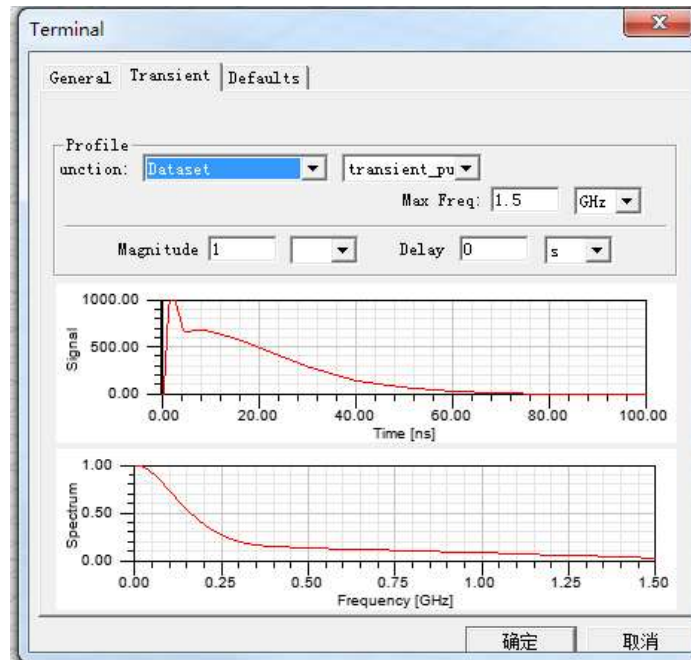
Road vehicles — Test methods for
electrical disturbances from electrostatic
discharge

*Véhicules routiers — Méthodes d'essai des perturbations électriques
provenant de décharges électrostatiques*

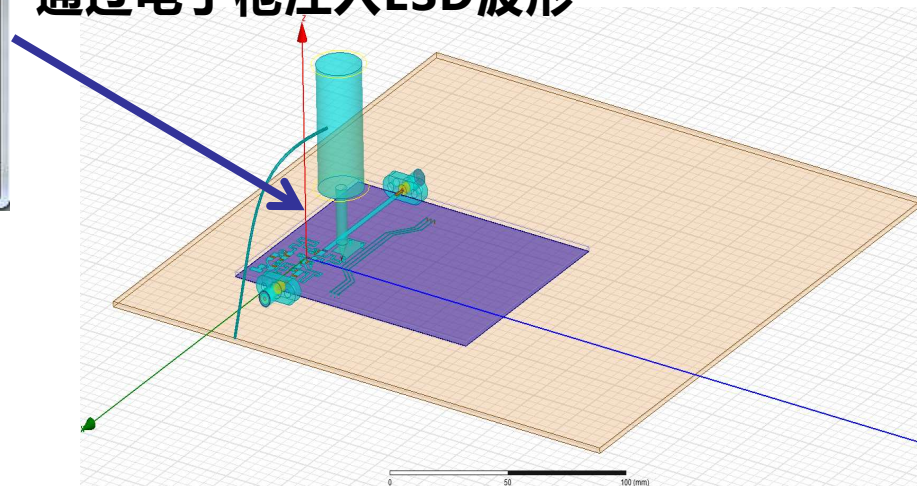


整车测试

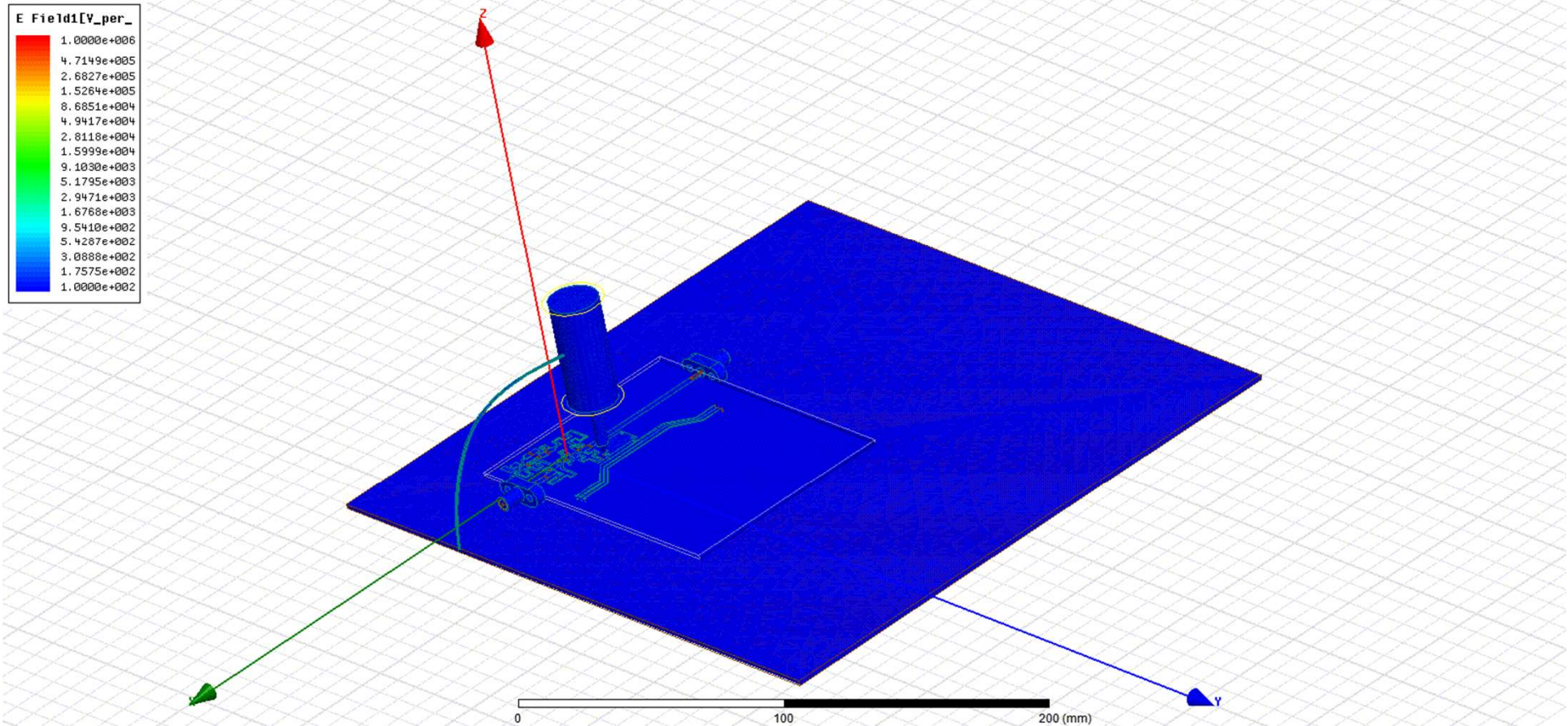
部件ESD测试



通过电子枪注入ESD波形

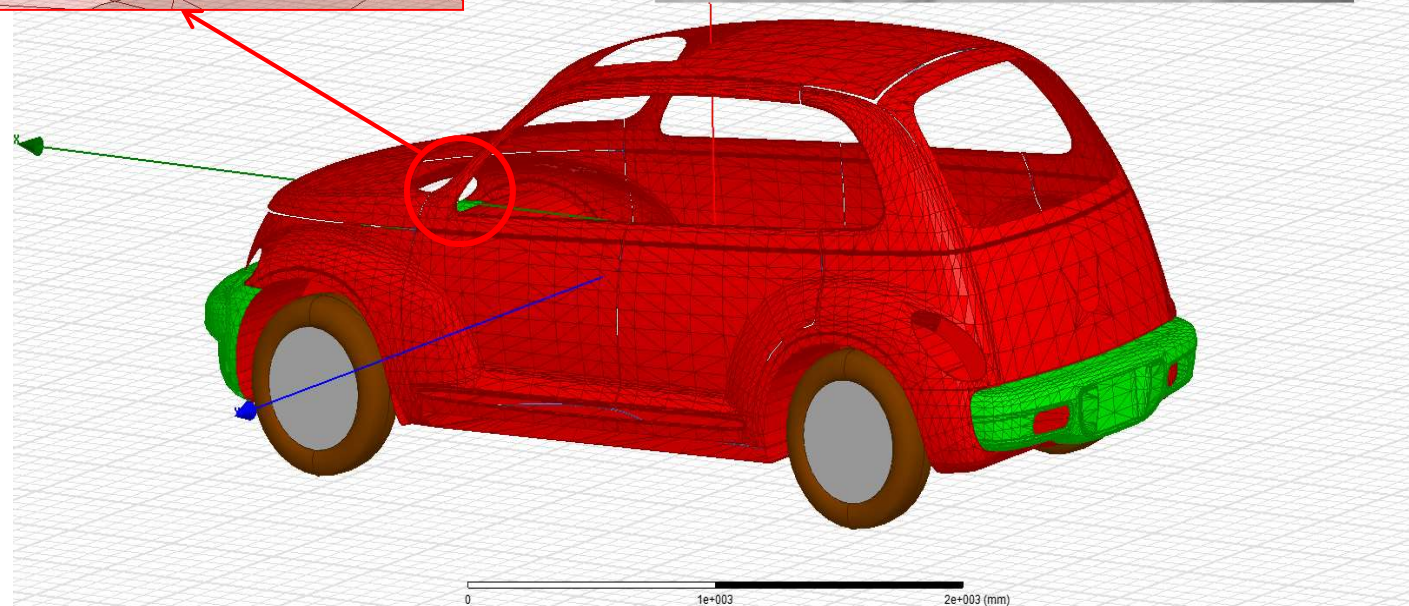
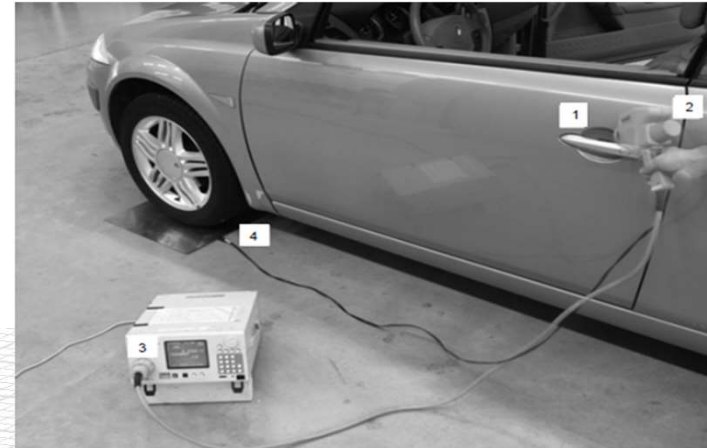
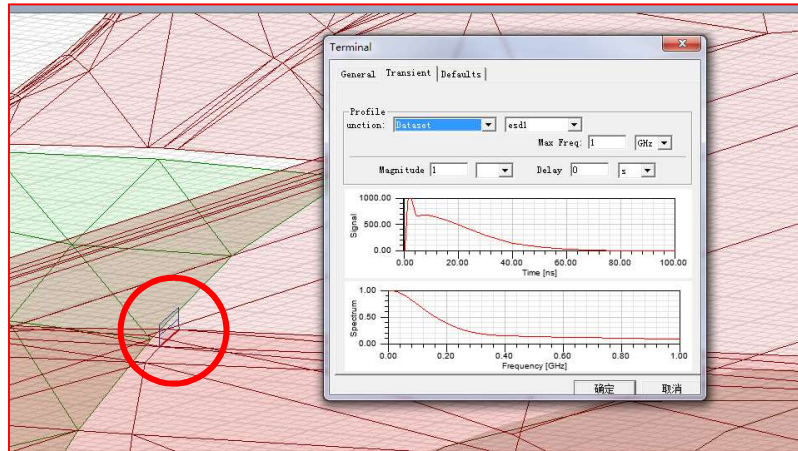


部件ESD测试

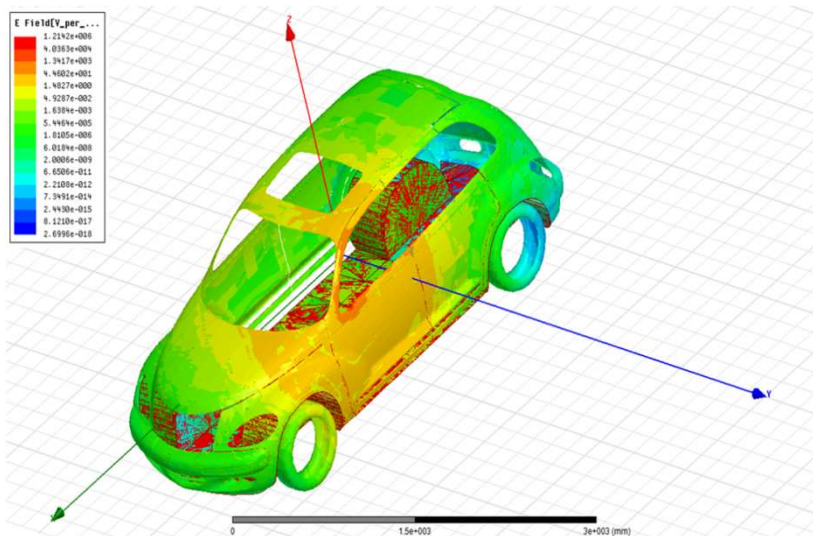


直观显示部件中随时间变化的电场

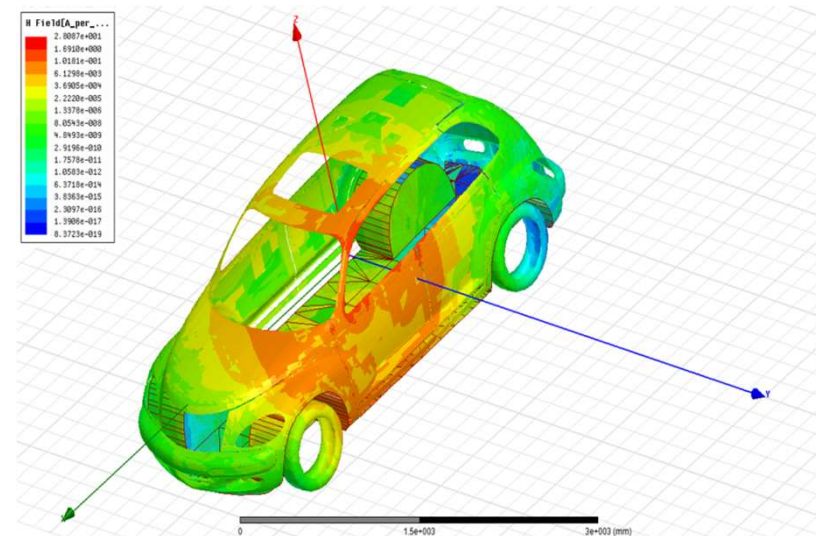
整车ESD测试



整车ESD测试

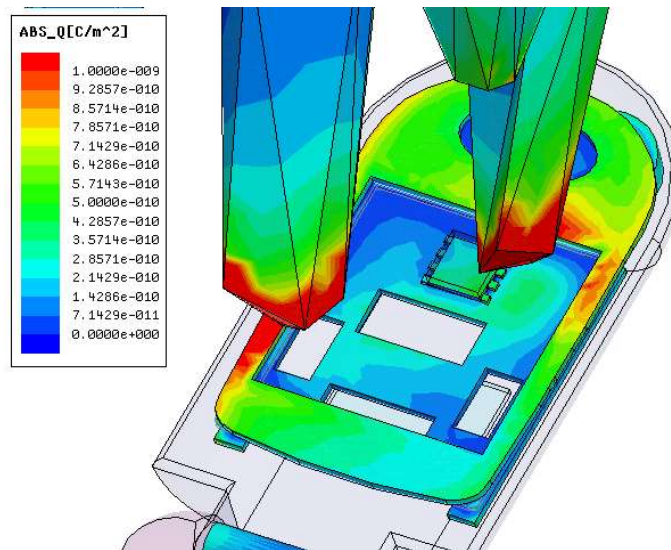
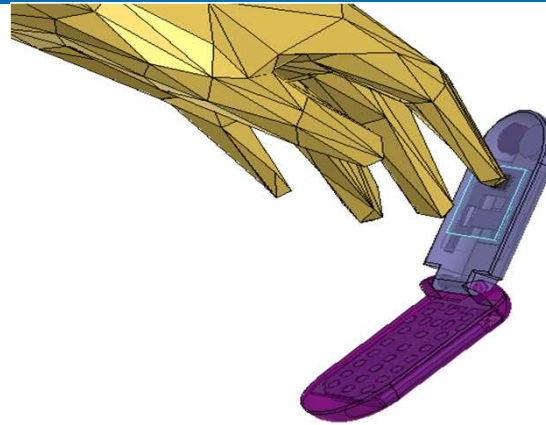


电场分布

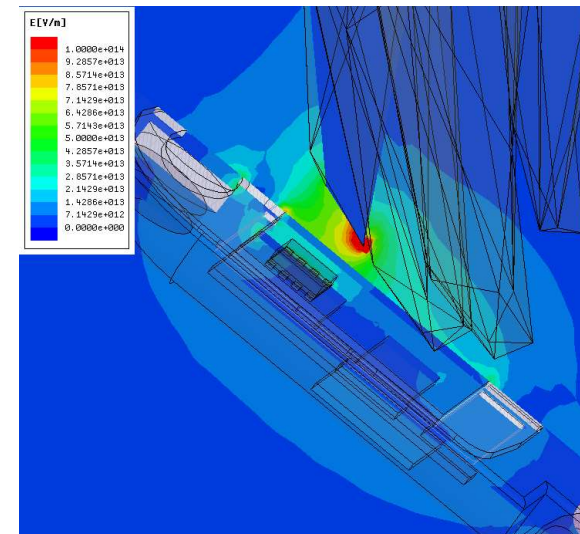


磁场分布

提高ESD保护能力---定位ESD风险区域

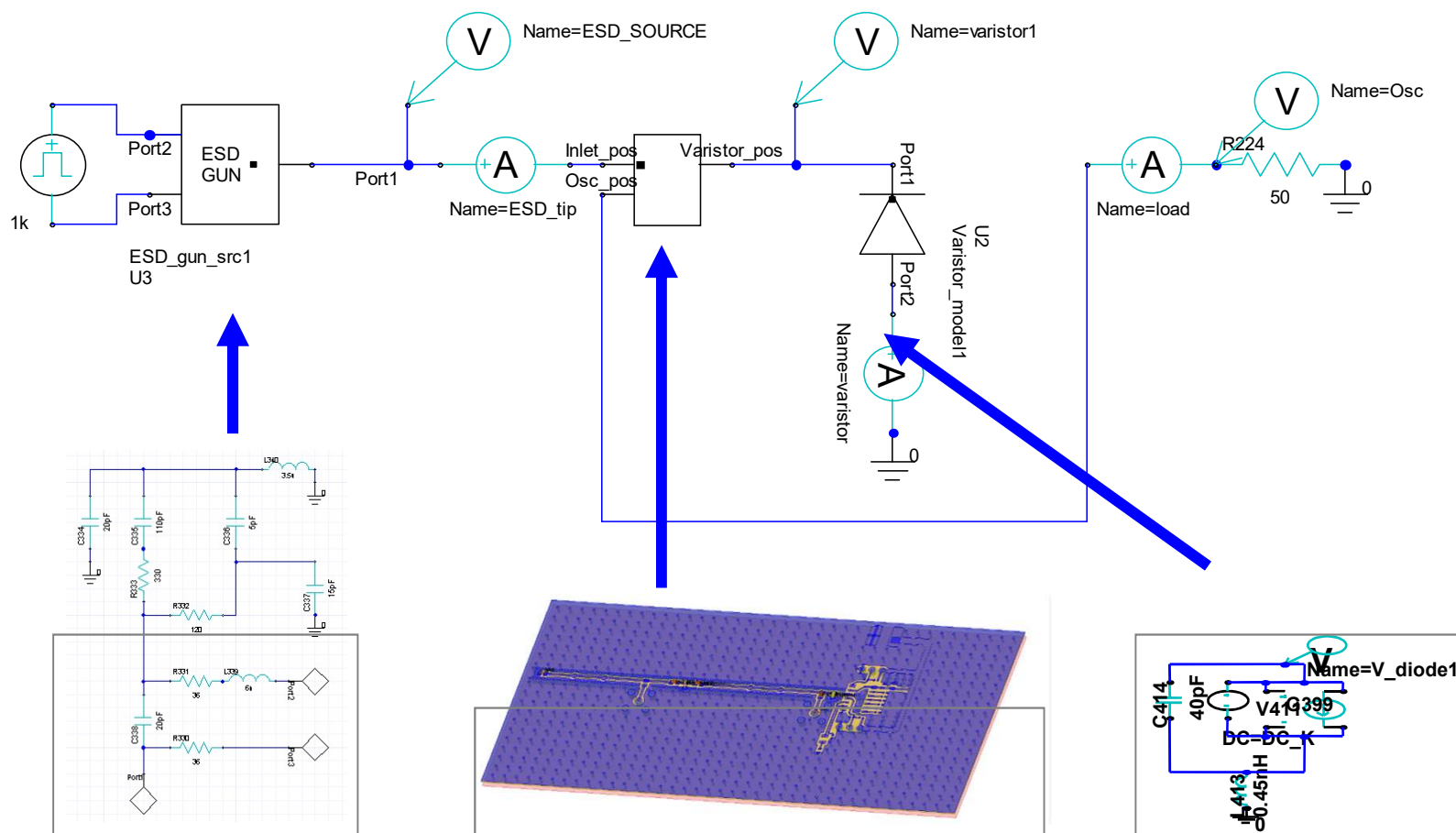


电荷分布



静电场分布

提高ESD保护能力---ESD保护器件分析

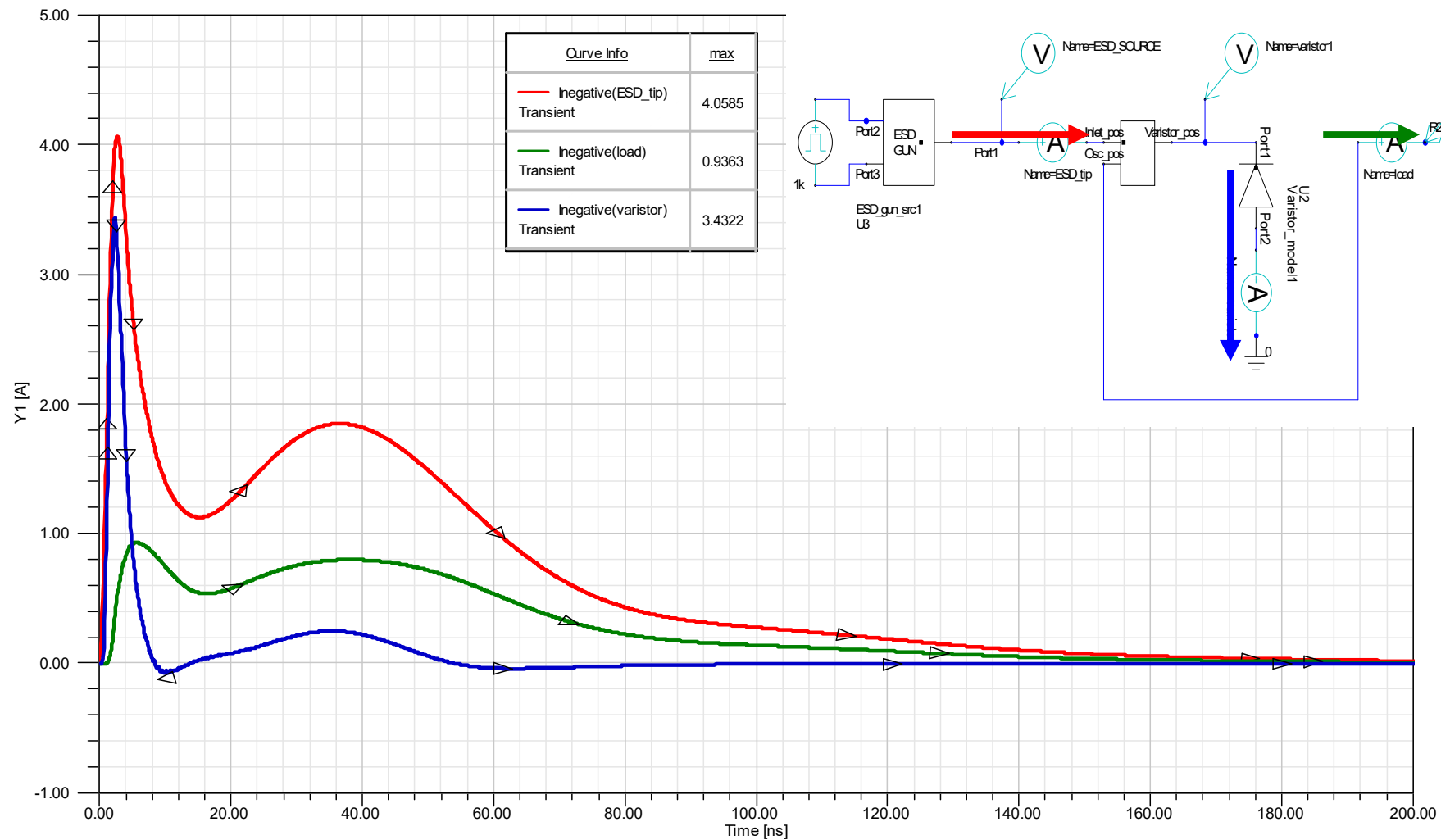


ESD电子枪

待测器件

ESD保护器件

提高ESD保护能力---ESD保护器件分析



BCI测试仿真

BS ISO 11451-4:2006

INTERNATIONAL
STANDARD

ISO
11451-4

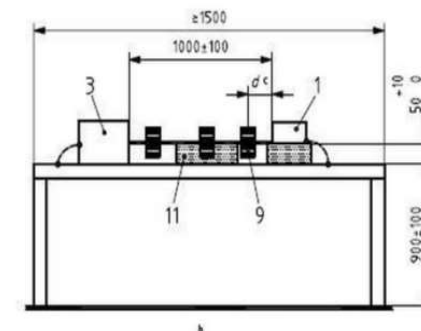
Second edition
2006-06-15

Road vehicles — Vehicle test methods for electrical disturbances from narrowband radiated electromagnetic energy —

**Part 4:
Bulk current injection (BCI)**

Véhicules routiers — Méthodes d'essai d'un véhicule soumis à des perturbations électriques par rayonnement d'énergie électromagnétique en bande étroite —

Partie 4: Méthode d'injection de courant (BCI)

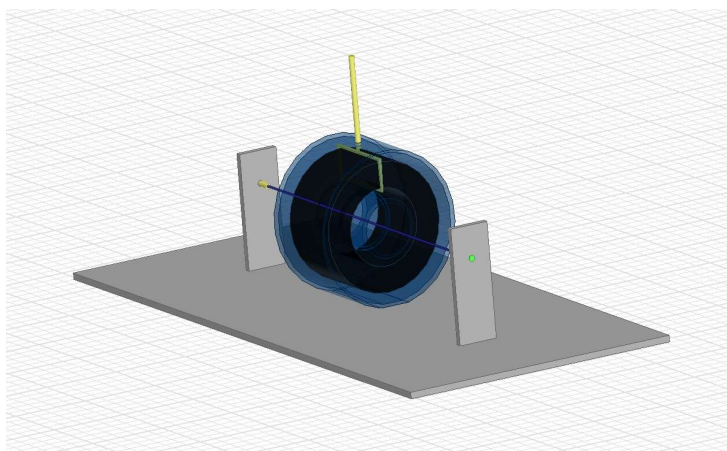


Key

- | | |
|--|--|
| 1 DUT (grounded if required in test plan) | 7 optical fibres |
| 2 test harness | 8 high-frequency equipment |
| 3 load simulator (placement and ground: connection according to 7.5) | 9 injection probe |
| 4 stimulation and monitoring system | 10 ground plane (bonded to shielded enclosure) |
| 5 power supply | 11 low relative permittivity support ($\epsilon_r \leq 1,4$) |
| 6 artificial network (AN) | 12 Shielded enclosure |

BCI 测试仿真

- ANSYS可提供标准的BCI测试探棒模型。
- 将BCI噪声探棒模型引入CE仿真电路，即可评估系统在BCI电流注入后的工作状态。



等效模型抽取



Solutions: probe_article4 - HFSSDesign1

Simulation: Setup1 Sweep

Design Variation: rotate1='1.4deg'

Profile | Convergence | Matrix Data | Mesh Statistics

☒ S Matrix ☐ Gamma 337 (MHz)

☐ Y Matrix ☐ Zo ☐ Display All Freqs.

☐ Z Matrix

Magnitude/Phase(deg)

Passivity Tol

Freq		S:1:1	S:2:1	S:noise1:1
337 (MHz)	1:1	(0.76902, -36.2)	(0.38081, -108)	(0.35196, 153)
	2:1	(0.38081, -108)	(0.76871, -36.2)	(0.35234, -26.6)
	noise1:1	(0.35196, 153)	(0.35234, -26.6)	(0.068318, 156)

结论

- 全面的汽车仿真解决方案覆盖EMC设计多个关键部件
- 分层次的3级EMC仿真，确保设计者能合理使用设计数据
- 将EMC设计与验证相结合，通过仿真平台对EMC问题进行有效优化
- 强大的模型修复与简化功能可帮助设计者大大提高工程效率
- 独特的场路结合确保设计者把握EMC设计的多个要素

采用ANSYS工具的顶级车辆企业

汽车厂商

Toyota
General Motors
Volkswagen
Ford
Hyundai
PSA
BMW
Honda
Renault
Tata Motors
SAIC
Volvo
Chrysler



汽车供应商

Bosch
Delphi
Yazaki
Magna
Valeo
Continental
Denso
Brose
Visteon
BorgWarner
Eaton
TRW
Dana



卡车/巴士和越野车

Caterpillar
Navistar
John Deere
Scania
Cummins
AGCO
Bobcat
CNH
Eicher
Tractors
Kubota Corp.
Mahindra & Mahindra
Volvo Truck



运动/两轮车

Red Bull
Ferrari
Toyota
Racing
McLaren
Racing
Force India
Hendrick
Motorsports
Sauber
Motorsports
Harley
Davidson
Bajaj Auto
Pratt & Miller



其它地面交通

Alstom Transport
Bombardier
Transportation
Deutsche Bahn
Electromotive
Diesel
Railway Technical
Research Institute
Japan
Zhuzhou Electric
Locomotive



汽车行业国内用户



分步实施

第一步：整车部件级EMC问题分析与优化

- 器件布局
- 线缆布局与干扰分析
- 整车EMC问题分析与优化
- EMC 测试标准验证

第二步：整车子系统关键部件EMC管控与优化

- 电机部件指标管控
- 天线部件管控
- ECU部件管控

第三步：整车系统级EMC优化与验证

- 全车电系统EMC分析
- 全车结构多物理场仿真

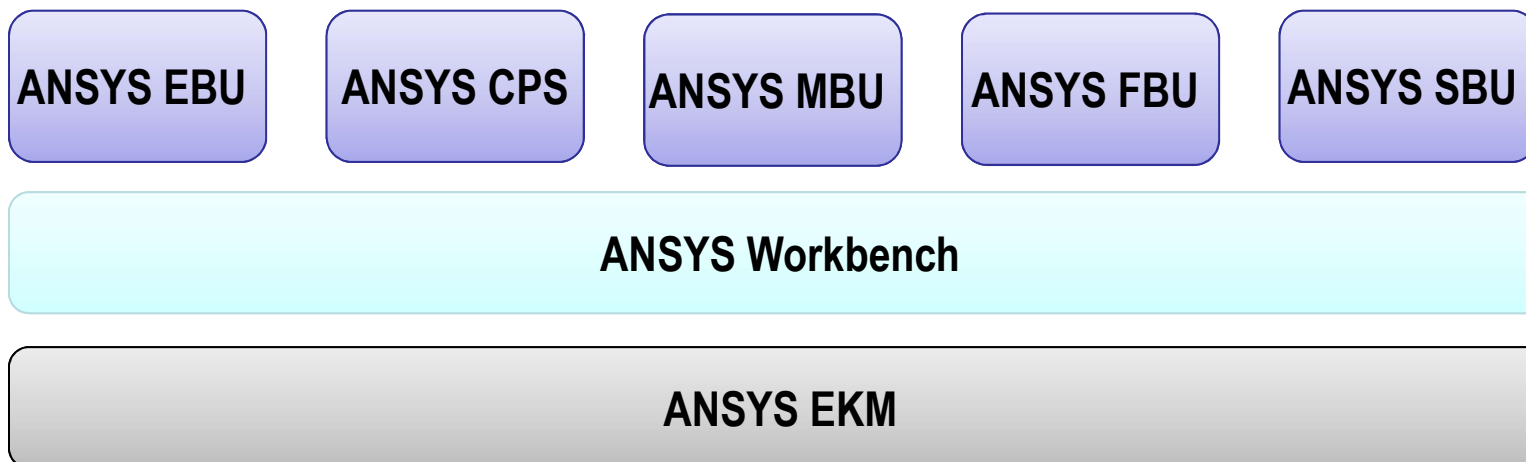
第一步：整车部件级EMC问题分析与优化

主模块					选项模块				
HFSS	Q3D	DesingerSI	Simplorer	SpaceClaim	HPC Packs	HFSS-TR Solver	HFSS IE Solver	OPT	Alinks
整车三维结构 辐射仿真软件	线缆专用仿 真软件	数字系统电 路仿真软件	机电系统电 路仿真软件	整车模型修复软件	高性能仿真 加速模块	瞬态三维仿 真模块	大尺寸物体 仿真模块	优化模块	三维模型接 口软件

第二步：整车子系统关键部件EMC管控与优化

主模块				选项模块		
HFSS	SIwave	Maxwell	RMxpert	HPC Packs	OPT	Alinks
天线仿真软件	PCB专用仿真软件	电机三维仿真软件	电机仿真专家软件	高性能仿真加速模块	优化模块	三维模型接口软件

第三步：整车系统级EMC优化与验证



Thank You!



关注微信公众号，推送年会报告早知道