

电磁场仿真分析系列

# 信号完整性 仿真分析方法

阎照文 等编著



中国水利水电出版社  
www.waterpub.com.cn

电磁场仿真分析系列

# 信号完整性仿真分析方法

阎照文 等编著



中国水利水电出版社  
[www.waterpub.com.cn](http://www.waterpub.com.cn)

## 内 容 提 要

本书全面介绍信号完整性分析中的仿真方法,包括二维参数提取、三维参数提取、原理性前仿真、板级后仿真、电源完整性仿真、电磁辐射仿真等,介绍了 Ansoft SI2D、Q3D、ADS、HyperLynx、SIwave 和 Designer 等在信号完整性仿真分析中的具体应用。

本书内容全面、例题较多,覆盖了信号完整性仿真分析方面最主要的内容和最常用的软件,并用软件分析的方法实现与信号完整性分析相关的案例,因此通过本书的学习,读者可以直接利用这些分析方法去从事与信号完整性分析相关的课题研究。

本书不管对于学习信号完整性分析的研究生还是对于从事信号完整性分析的科技人员,都是一本难得的实用教材。

## 图书在版编目(CIP)数据

信号完整性仿真分析方法 / 阎照文等编著. — 北京:  
中国水利水电出版社, 2011. 1  
(电磁场仿真分析系列)  
ISBN 978-7-5084-8053-4

I. ①信… II. ①阎… III. ①信号系统: 仿真系统—完整性—分析方法 IV. ①TN911.6

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第219855号

策划编辑: 杨元泓

责任编辑: 李 炎

封面设计: 李 佳

书 名	电磁场仿真分析系列 信号完整性仿真分析方法
作 者	阎照文 等编著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: mchannel@263.net (万水) sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (营销中心)、82562819 (万水)
经 售	全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	北京万水电子信息有限公司
印 刷	北京蓝空印刷厂
规 格	184mm×260mm 16开本 30.75印张 816千字
版 次	2011年1月第1版 2011年1月第1次印刷
印 数	0001—5000册
定 价	68.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

# 前 言

随着时钟频率的日益提高,信号完整性问题变得越来越突出,过去不成为信号完整性的问题现在已经变成信号完整性问题了。因此信号完整性已成为从事高速电路设计的人们关注的焦点,也是他们目前研究的热点。显然,关于信号完整性问题的研究国外要比国内先进得多,国外每年都有大量的涉及到信号完整性问题的会议,在各类期刊上都有信号完整性问题的论文发表,并且已出版了十几种关于信号完整性的教材和专著。为了跟踪追赶国外的先进水平,国内先后翻译出版了几种关于信号完整性方面的教材,在国内信号完整性研究领域起到了很大的推动作用。

我校从 2005 年开始为研究生开设“信号完整性分析”这门课程,至今已有五年。在“信号完整性分析”的教学和科研当中,编写者积累了一定的经验,深知只有通过大量的仿真实验,才能深入理解信号完整性分析的基本概念和研究方法,并且作者在教学中积累了大量的分析案例供学生使用。通过这些实例分析,使学生首先产生直观的印象,对“信号完整性分析”这门课程产生浓厚的兴趣,然后再通过对软件的学习和掌握,使学生可以直接进入信号完整性分析的前沿领域,利用这些工具进行课题研究。软件案例分析在教学中已经发挥了很大的辅助作用。

本书提供用软件分析的方法实现与信号完整性分析相关的案例研究,不涉及信号完整性分析的基础理论知识以及测试方法。通过本书的学习,读者可以直接利用这些分析方法去从事与信号完整性分析相关的课题研究。不论是学习信号完整性分析的研究生还是从事信号完整性分析的科技人员,本书都是一本难得的实用教材。由于本书涉及的软件较多,所以不可能把所有的软件的功能都介绍清楚,但对于从事信号完整性分析的读者来说,最主要的软件和最基本的分析过程都已经介绍了。如果想深入研究某一软件的详细功能,还需要参考相关的更专业的书籍。

本书包括 9 章。第 1 章主要介绍信号完整性仿真分析的几个关系问题,包括信号完整性研究的内容、信号完整性与其他课程的关系、电磁场类研究方向之间的关系、信号完整性与电磁兼容之间的关系、信号完整性与 PCB 设计之间的关系、信号完整性常用仿真分析软件等。第 2 章介绍二维模型参数提取工具和方法——用 Ansoft SI2D 进行二维参数提取。第 3 章介绍三维模型参数提取工具和方法——用 Q3D 进行三维参数提取。第 4 章介绍 ADS 在信号完整性分析中的应用。第 5 章介绍了用 HyperLynx 进行原理性仿真分析的方法。第 6 章介绍用 HyperLynx 进行 PCB 板的仿真分析方法,这一章涉及到后仿真问题,所以对从事具体 PCB 仿真设计的工程技术人员是很实用的内容。第 7 章介绍用 SIwave 进行电源完整性分析,在过去的设计中很少用到电源平面,最近几年才逐渐开始设计利用电源平面,所以这部分内容是比较新的。第 8 章介绍用 SIwave 和 Designer 进行板级信号完整性分析,内容与第 6 章的类似,只是分析软件不同。由于 SIwave 和 Designer 使用的都是有限元法,所以分析精度方面要比 HyperLynx 好。第 9 章介绍 PCB 板级辐射仿真分析方法,主要介绍如何用 SIwave 和 HFSS 进行板级的辐射分析,这章的内容在过去很少被用到,所以也是较新的内容。

本书由阎照文组织编写，参加编写和整理工作的有王刚、车明明、韩雅静、姜英杰、王涛、付路、张兰兰、于晓丰、田国亮、韩轶峰、栗伟珉、刘焱、王向晖、王冰切、翟禹、哈聪颖、康骊等，在此向他们表示感谢。

编写这样一本书的想法很早就有了，经过几年不断的资料积累和大家的共同努力，本书终于与读者见面了。在编写本书的过程中参考了大量的书籍和资料，在此向提供资料的单位和个人表示感谢，恕不能在此一一列举。虽然编写者付出了大量的艰苦工作来策划和编写本书，但由于时间紧迫，水平所限，缺点与错误在所难免，欢迎使用本书的读者批评指正。

联系地址：yanzhaowen@buaa.edu.cn。

阎照文  
于北京航空航天大学  
2010年10月

# 目 录

## 前言

第 1 章 信号完整性仿真分析方法概述	1	3.1.9 设计窗口	83
1.1 信号完整性研究的内容	1	3.1.10 工具栏	84
1.2 信号完整性与其他课程的关系	7	3.1.11 显示或隐藏单个工具栏	84
1.3 电磁场类研究方向之间的关系	7	3.1.12 自定义排列工具栏	84
1.4 信号完整性与电磁兼容之间的关系	8	3.1.13 Q3D Extractor 桌面	85
1.5 信号完整性与 PCB 设计之间的关系	8	3.1.14 打开一个 Q3D 项目	86
1.6 信号完整性常用仿真分析软件介绍	9	3.2 Q3D 实例分析	86
1.7 本书的章节结构安排	9	3.2.1 微带线	86
第 2 章 用 Ansoft SI2D 进行二维参数提取	11	3.2.2 微小过孔	97
2.1 SI2D 简介	11	3.2.3 分段返回通路	109
2.1.1 什么是 SI2D 提取器	11	3.2.4 球陈列封装	117
2.1.2 二维场求解器的设计环境	11	3.2.5 连接器模型	129
2.1.3 快速启动 SI2D	12	3.2.6 接合线	138
2.2 例题	13	3.2.7 螺旋电感	145
2.2.1 同轴线	13	第 4 章 ADS 在信号完整性分析中的应用	155
2.2.2 同轴线——从三维模型导出 二维模型	21	4.1 ADS 的基本使用	155
2.2.3 差分对	30	4.1.1 ADS 主要操作窗口	155
2.2.4 过度蚀刻	42	4.1.2 ADS 基本操作	157
2.2.5 键合线	49	4.2 元器件的等效电路模拟	163
2.2.6 串扰	56	4.2.1 示波器探针的等效电路模型	163
2.2.7 平面波导	63	4.2.2 RLC 电路的时域行为	164
2.2.8 接地的平面波导	71	4.2.3 两焊盘间键合线回路的等效 电路模型	165
第 3 章 用 Q3D 进行三维参数提取	79	4.2.4 去耦电容的等效电路模型	167
3.1 什么是 Q3D Extractor	79	4.2.5 驱动器的等效电路模型	168
3.1.1 系统需求	79	4.2.6 如何构造求阻抗的电路模型	168
3.1.2 启动 Ansoft Q3D	80	4.2.7 传输线的等效电路模型	170
3.1.3 把旧的 Q3D 文件导入 Q3D Extractor 6 中	80	4.3 传输线的反射仿真	171
3.1.4 Ansoft 条目	80	4.3.1 阻抗不匹配而产生的振铃	171
3.1.5 项目管理器	81	4.3.2 驱动源的内阻抗情况	171
3.1.6 特性窗口	82	4.3.3 反弹图仿真	172
3.1.7 Ansoft 3D 建模器	82	4.3.4 反射波形仿真	173
3.1.8 3D 建模器设计树	83	4.3.5 仿真 TDR 测量原理	174
		4.3.6 何时需要端接	175

4.3.7	源端端接	176	5.2	元器件的等效电路模拟	208
4.3.8	源端端接情况下的传输线增加	176	5.2.1	带宽对上升时间的影响	208
4.3.9	短串接传输线的反射	177	5.2.2	不同覆盖厚度时微带线周围的 电场分布	209
4.3.10	短串接传输线的反射(续)	178	5.3	传输线的反射仿真	211
4.3.11	短桩线的反射	180	5.3.1	传输线如何影响驱动器的波形	211
4.3.12	容性终端负载的反射	181	5.3.2	用 2D 场求解器计算微带线中 电场的分布	214
4.3.13	连线中途的容性负载反射	182	5.3.3	反弹图	216
4.3.14	容性时延累加	183	5.3.4	反射波形仿真	217
4.3.15	有载线	183	5.3.5	何时需要端接	219
4.3.16	感性突变产生的反射	185	5.3.6	源端端接	222
4.3.17	感性时延累加	186	5.3.7	源端端接时传输线长度的影响	222
4.3.18	补偿	187	5.3.8	短串接传输线的反射	225
4.4	考虑损耗时的仿真	188	5.3.9	短串接传输线的反射(续)	227
4.4.1	信号的损耗	188	5.3.10	短桩线传输线的反射	230
4.4.2	有损耗传输线的建模	188	5.3.11	容性终端负载的反射	233
4.4.3	传输线测试模型	189	5.3.12	传输线中途的容性负载反射	236
4.5	传输线的串扰仿真	190	5.3.13	容性时延累加	239
4.5.1	容性耦合电流	190	5.3.14	有载线	239
4.5.2	感性耦合电流	192	5.3.15	感性突变产生的反射	243
4.6	差分对仿真	193	5.3.16	感性时延累加	245
4.6.1	差分对的端接	193	5.3.17	补偿	245
4.6.2	差分信号向共模信号的转化	194	5.4	考虑损耗时的仿真	248
4.6.3	差分对一根信号线接容性负载时 的情况	196	5.4.1	损耗对传输线的影响	248
4.6.4	差分对端接对共模信号的影响	197	5.4.2	有损线的时域行为	248
4.6.5	同时端接共模和差模	197	5.4.3	不同长度传输线对输出信号 的影响	251
4.6.6	同时端接共模和差模有错位	198	5.4.4	损耗对眼图的影响	255
<b>第 5 章</b>	<b>用 HyperLynx 进行原理性仿真分析</b>	<b>200</b>	5.5	传输线的串扰仿真	257
5.1	HyperLynx 的基本使用	200	5.5.1	近端串扰	257
5.1.1	建立新的单元胞格式的版图	200	5.5.2	远端串扰	258
5.1.2	增加传输线	201	5.5.3	仿真串扰	259
5.1.3	增加 IC	202	5.5.4	有源串联端接的耦合线	260
5.1.4	增加电阻、电感和电容	204	5.5.5	多条耦合线攻击时的串扰	261
5.1.5	编辑电源电压	205	5.5.6	带状线的情况	263
5.1.6	设置和运行仿真	205	5.5.7	防护布线	265
5.1.7	观察仿真结果	206	5.5.8	串扰和时序	269
5.1.8	测量时间和电压	207	5.6	差分对仿真	272
5.1.9	记录仿真结果	207			
5.1.10	保存新的版图	208			

5.6.1	差分电路的端接	272	6.2.6	同时观察所有的网络	312
5.6.2	微带线和带状线的电场分布	273	6.2.7	观察板图布局	312
5.6.3	端接差分信号	275	6.2.8	观察 PCB 板图细节	312
5.6.4	端接共模信号	280	6.3	Session Edits 保存的信息	314
5.6.5	差分对中的串扰	283	6.3.1	BoardSim 怎样保存为 Session Edits	314
5.6.6	差分对中的共模噪声	285	6.3.2	.BUD 文件中具有什么信息	315
5.6.7	差分对对差分对的噪声	287	6.3.3	怎样保存为 Session Edits	315
5.6.8	返回路径中的间隙	290	6.3.4	当 Session Edits 被重新加载时	316
5.6.9	间隙对差分对的影响	291	6.4	终端向导和快速终端	317
5.7	使用 HyperLynx 进行时序调整	292	6.4.1	终端向导 (Terminator Wizard)	317
5.7.1	概述	292	6.4.2	快速终端 (Quick Terminators)	318
5.7.2	时序调整	292	6.4.3	交互式编辑 R、L 和 C	318
5.7.3	从实际板图电路提取原理 仿真电路的方法	294	6.4.4	创建一个新的改变报告	319
5.8	怎样使用 IBIS 模型	295	6.5	批处理仿真	320
5.8.1	概述	295	6.5.1	了解批处理仿真	320
5.8.2	V/I 数据	296	6.5.2	准备批处理仿真的板图	322
5.8.3	V/T 数据	298	6.5.3	运行批处理仿真向导	325
6.5.4			6.5.4	批处理仿真报告	326
<b>第 6 章</b>	<b>用 HyperLynx 进行 PCB 板的仿真分析</b>	<b>299</b>	6.6	运行 EMC 仿真	326
6.1	用 HyperLynx 进行 PCB 后仿真的 基本过程	299	6.6.1	设置频谱分析仪探针	326
6.1.1	在 BoardSim 中打开 PCB	299	6.6.2	使用频谱分析仪运行 EMC 仿真	329
6.1.2	在 BoardSim 中编辑叠层和线宽	299	6.7	在 BoardSim 中交互式仿真串扰	332
6.1.3	映射器件类型的参考指示符	301	6.7.1	实现交互式板图后串扰仿真	332
6.1.4	编辑电源网络	302	6.7.2	BoardSim 怎样找到串扰网络	333
6.1.5	选择要仿真的网络	303	6.7.3	怎样显示攻击线	333
6.1.6	选择 IC 元器件模型	303	6.7.4	设置串扰仿真的 IC 模型	334
6.1.7	编辑电阻、电感、电容参数值	305	6.7.5	运行仿真	334
6.1.8	确定电阻和电容封装	305	6.7.6	怎样最大化仿真特性	336
6.1.9	设置和运行交互式仿真	306	6.7.7	改变攻击网络的数量	336
6.1.10	观察仿真结果	307	6.8	在 BoardSim 中运行场求解器	337
6.1.11	测量时间和电压	308	6.8.1	关于 BoardSim 串扰和场求解器	337
6.1.12	记录仿真结果	308	6.8.2	什么是场求解器	337
6.2	观察 BoardSim 的特性	309	6.8.3	BoardSim 串扰场求解器是 怎样工作的	338
6.2.1	板图用户界面	309	6.8.4	打开耦合观察器	338
6.2.2	放大和平移	310	6.8.5	报告网络段的特性	340
6.2.3	改变板的方向	310	6.9	多块 PCB 板的分析	340
6.2.4	改变显示	310	6.9.1	什么是多板选项	340
6.2.5	突出网络显示	311	6.9.2	互联模型	341



6.9.3	互联电气特性	341	8.2.4	主窗口中的叠层观察	431
6.9.4	MultiBoard Project Wizard 概述	341	8.2.5	导体设置	431
6.9.5	关于板图 ID	342	8.2.6	走线设置	432
6.9.6	映射.HYP 文件到板图 ID 中	342	8.2.7	求解设置	433
6.9.7	关于互连关系映射的说明	343	8.2.8	观察谐振模式	434
6.9.8	插入新的.HYP 文件	344	8.2.9	源的定义	434
6.9.9	删除连接的.HYP 文件	344	8.2.10	终端的定义	435
6.9.10	插入新的互联映射	344	8.2.11	编辑电路元件属性	435
6.9.11	编辑 MultiBoard Project Wizard 的提示框	344	8.2.12	设置频率扫描	436
6.9.12	创建或编辑一个多板的项目文件	345	8.2.13	求解	436
6.9.13	编辑多板工程	350	8.2.14	共模模式设置	437
6.9.14	打开多板项目文件	352	8.2.15	频率扫描设置	437
<b>第 7 章</b>	<b>用 SIwave 进行电源完整性分析</b>	<b>353</b>	8.2.16	端口设置	438
7.1	版图设计	353	8.2.17	设置 SPICE 求解	439
7.2	封装板的阻抗分析	371	8.2.18	SPICE 差分对	441
7.3	封装板的 S 参数	381	8.2.19	电路结构	442
7.4	同步开关噪声 (SSN)	396	8.2.20	求解电路 (差模模式)	444
7.5	系统级封装器件	411	8.2.21	后处理电路	445
<b>第 8 章</b>	<b>用 SIwave 和 Designer 进行板级信号 完整性分析</b>	<b>415</b>	8.2.22	共模模式	445
8.1	T 型板分析	415	8.2.23	共模模式仿真结果	446
8.1.1	模型描述	415	8.3	传输时延	447
8.1.2	设置设计环境	416	8.3.1	绘制金属层	447
8.1.3	创建模型	419	8.3.2	绘制走线	454
8.1.4	求解方案	424	8.3.3	添加过孔	455
8.1.5	仿真结果分析	428	8.3.4	添加去耦电容	459
8.2	分析封装上的差分对	430	8.3.5	SIwave、Designer 结合仿真	459
8.2.1	定义全局材料属性	430	<b>第 9 章</b>	<b>PCB 板级辐射仿真分析方法</b>	<b>469</b>
8.2.2	打开工程	430	9.1	在 SIwave 中建立激励源	469
8.2.3	叠层设置	431	9.2	在 HFSS 中进行远场求解	471
			<b>参考文献</b>		<b>482</b>

# 信号完整性仿真分析方法概述

## 1.1 信号完整性研究的内容

信号完整性指的是在高速产品中由互连线引起的所有问题。它主要研究当互连线与数字信号的电压电流波形相互作用时其电气特性参数如何影响产品的性能。通常把信号完整性问题归结为下列前四个问题中的一个，后四个问题是作者延伸的与信号完整性有关的问题，从广义上说，也可以归为信号完整性问题。

- 传输线的反射、传输时延问题
- 多网络间的串扰问题
- 电源完整性问题
- 电磁辐射问题
- 电磁敏感度仿真分析方法
- 电磁辐射测试方法及测试系统
- 电磁敏感度测试方法
- 综合多物理场分析方法

### 1. 传输线的反射、传输时延问题

当信号从驱动源输出时，它将沿着传输线不断地向前传播，由于传输线存在弯曲、线宽变化、层转换、间隙、接插件、分支、末端等，传输线的瞬态阻抗可能会发生变化，一旦阻抗发生变化，信号就会在变化处产生反射，并在通过互连线的剩余部分时发生失真。如果阻抗突变程度足够大，失真就会导致错误的触发。

图 1-1 为某模拟板，板上的黄色线表示一条蛇形线，当蛇形线的末端没有端接时，该线末端信号就会出现振铃，如图 1-2 所示。那么该怎样消除振铃？应该端接多大的终端电阻？采用蛇形线后信号的传输时延发生了怎样的变化？这些问题就是信号完整性分析所研究的内容。

### 2. 多网络间的串扰问题

当网络传播信号时，有些电压和电流能传递到邻近的静态网络上，即使第一个网络（动态网络）上的信号质量非常好，一些信号也会以有害的噪声形式耦合到第二个静态网络上。这就是网络间的串扰问题。

如图 1-3 所示，黄色的两条线就构成了两个网络，左边的一条线为动态网络，右边的一条线为静态网络。通过仿真，动态线上的信号在静态线上产生的噪声如图 1-4 所示，其中在上升沿附近向

上的红色线表示近端串扰，向下的红色线表示远端串扰。近端串扰的最大值可达 0.34V。

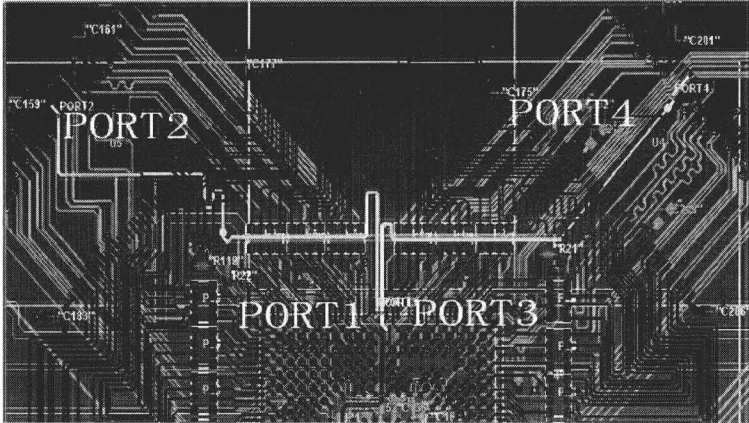


图 1-1 模拟板

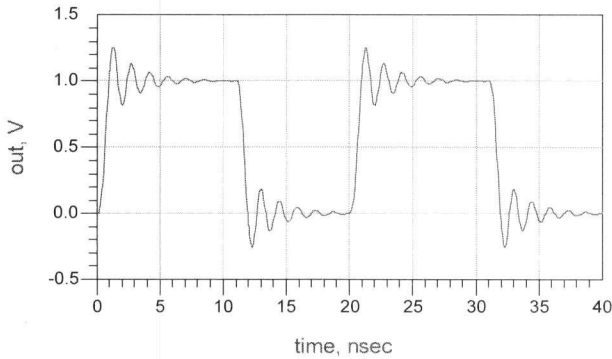


图 1-2 蛇形线的输出端产生了振铃

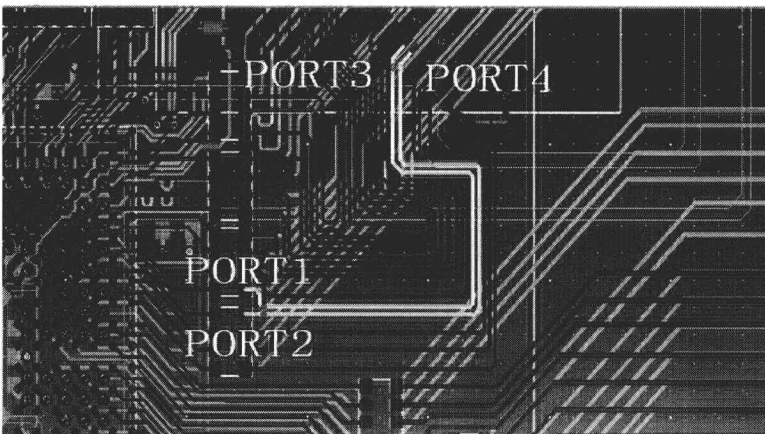


图 1-3 两个网络

串扰的机理是什么？如何减少串扰？动态线与静态线的间距如何选择比较合适？这些问题也属于信号完整性研究的内容。

05 Dec 2007

Ansoft Corporation  
XY Plot 1  
Nexxim Circuit 1

09:54:23

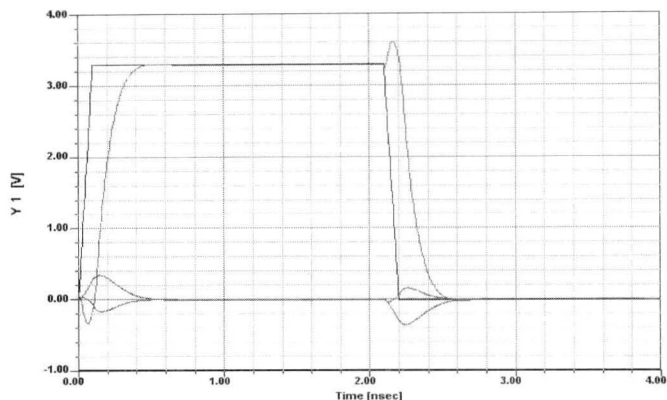


图 1-4 串扰的大小

### 3. 电源完整性问题

当通过电源和地路径的电流发生变化时（比如芯片输出翻转或核心门翻转时），在电源路径和地路径间的阻抗上将产生一个压降。这个压降就意味着供给芯片的电压减小了，可以看作是电源和地间的电压减小或塌陷。轨道塌陷的严重后果是提供给芯片的电压不足于使芯片能够正确的工作。

此外，在电源和地之间可能会形成一个谐振腔体，这个谐振腔体会有一些谐振频率点，那么工作频率就不能落在这些谐振频率点上。图 1-5 为模拟器的某一谐振频率点，图 1-6 为对模拟器进行处理后该谐振频率点消失了。

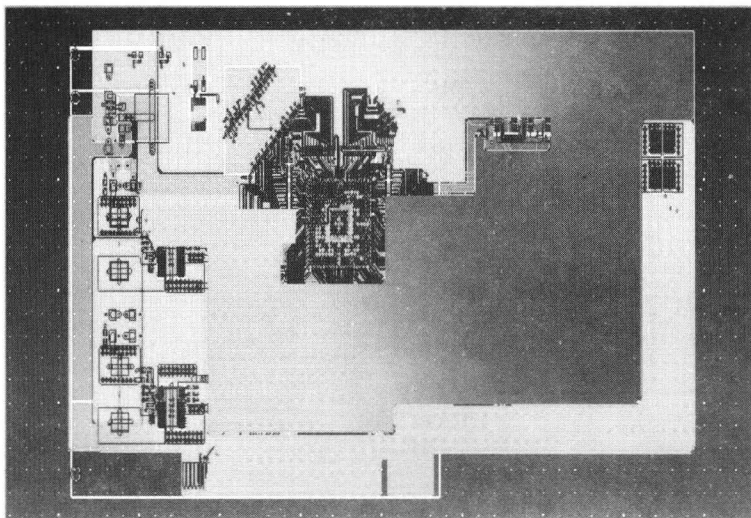


图 1-5 模拟器的一个谐振频率点

怎样设计一个电源平面和地平面？消除谐振频率点应该采取哪些措施？这些都应该是电源完整性所研究的内容。

### 4. 电磁辐射问题

当板级时钟频率大于 500MHz 时，电子产品产生的辐射就会很严重。产生辐射的大多数电压来自电源和地分配网络。图 1-7 为某模拟器时钟产生的辐射，显然它的辐射已经超过了限制值。

如何快速计算辐射？如何减少辐射？辐射与哪些因素有关？这些也是信号完整性分析所需要关心和解决的。

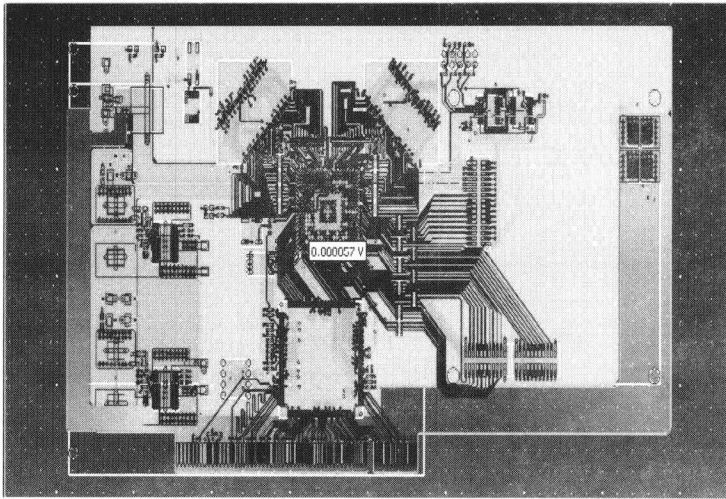


图 1-6 谐振频率点消失了

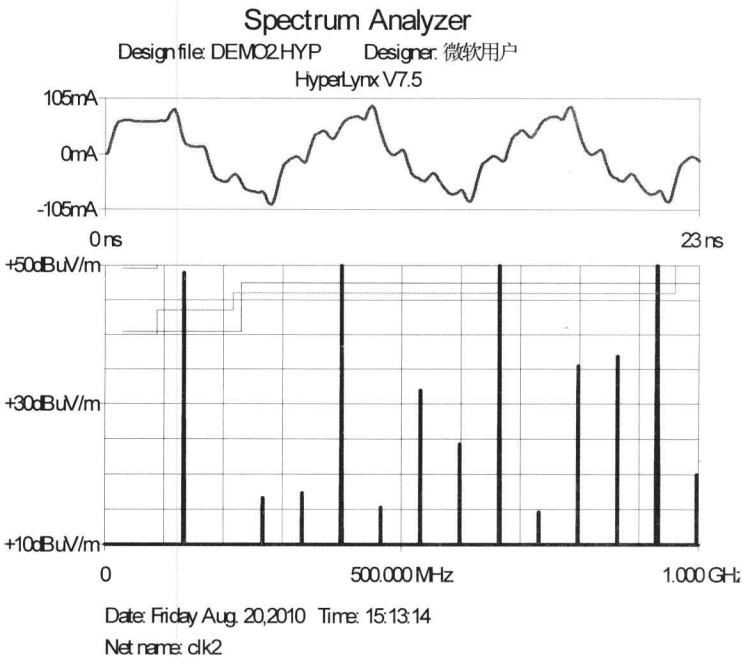


图 1-7 时钟信号产生的辐射

### 5. 电磁敏感度仿真分析方法

敏感度指的是电路板上的元器件抗电磁干扰的能力。实现板级电磁兼容敏感度的“事先评估”，以便提前预测可能出现的问题，为采取加固措施提供具体的参数指标，这些都是板级电磁兼容设计者所追求的目标。但是关于板级电磁兼容敏感度目前还没有具体有效的分析方法，即使论文中出现了一些分析方法，也都是处于探索和研究当中，远远达不到实用阶段。所以，板级电磁兼容敏感度

也是信号完整性所研究的重要内容之一。

图 1-8 所示为一种电磁兼容敏感度行为级量化分析方法的模型示意图,利用该模型可以同时求解两个元器件的电磁兼容敏感度。

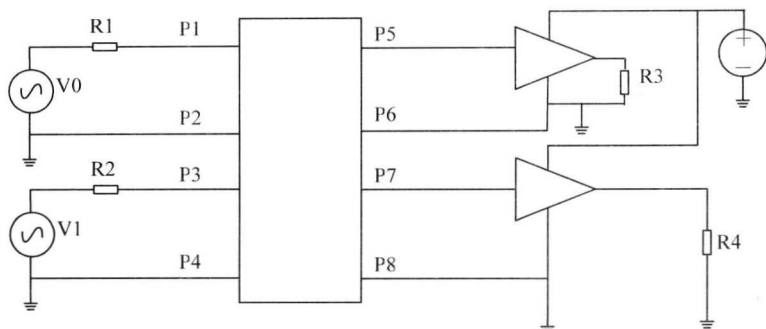


图 1-8 电磁兼容敏感度行为级量化分析的模型示意图

#### 6. 电磁辐射测试方法及测试系统

当电路板完成元器件的焊接之后如何测试它的电磁辐射?当电路板加电后不能正常工作,如何进行故障诊断?探头对测试精度的影响如何?虽然目前市场上已出现了几种电路板的故障诊断测试系统(如图 1-9 所示),但是这些问题还没有得到根本的解决。测试的速度和效率问题、测试的灵活性问题、测试的成本问题、测试的精度问题、测试系统的研制等,还有许多问题需要研究。



图 1-9 电路板故障诊断系统

#### 7. 电磁敏感度测试方法

电路板级电磁敏感度测试方法目前还没有标准可以遵循,只能参考设备级敏感度的测试方法,如图 1-10 所示。在测试电路板级敏感度时,如何观察元器件的敏感性?如何测量串扰的大小?测量探头和示波器对元器件的敏感度测量的影响如何?这些问题也是目前研究的难点和热点,这方面的文献也相对较少。因此有许多工作是需要研究和探索的。

#### 8. 综合多物理场分析方法

我们知道,电路板的设计其实是一个多方面因素的设计,包括电磁的、结构的、热的等,在前面我们只关注了电磁方面的设计,而忽略了其他因素的设计。随着电路板使用环境的复杂,在高温、高压和强电磁脉冲下,必须同时考虑它的电磁、结构和热等多物理场的设计。多物理场是同时存在

并且是相互转化的，比如电流可以产生热，热产生了温度，温度使结构发生了变形，结构的变形又改变了电气特性，又会产生新的电磁干扰问题。这就是多物理场的相互转化问题。关于多物理场的综合设计目前还是一个比较新的研究内容，还没有成熟的方法和结论，还有大量的问题需要我们去研究，是值得关注的研究方向。

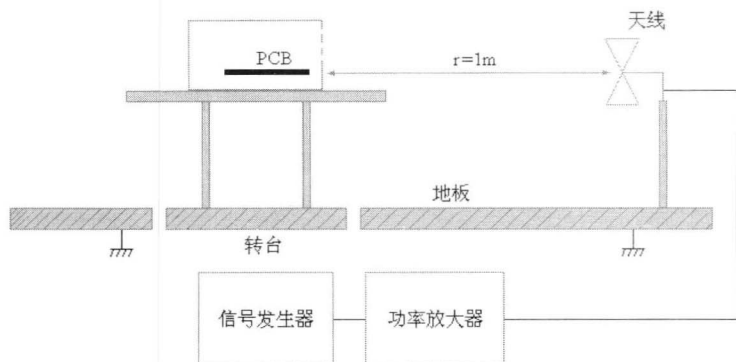


图 1-10 电路板敏感度测试方法

图 1-11 为某一波导的传输模式图，图 1-12 为该波导表面的温度分布，温度产生了热，热引起波导的结构变形，结构变形改变了波导的传输模式，图 1-13 为结构变形后的传输模式，由图可见，波导模式确实发生了改变。

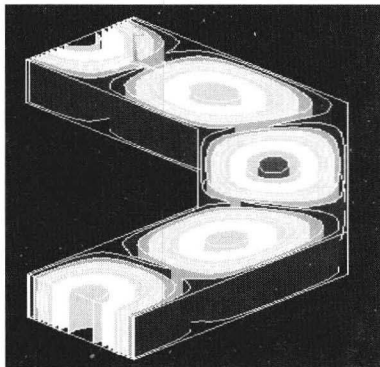


图 1-11 波导传输模式

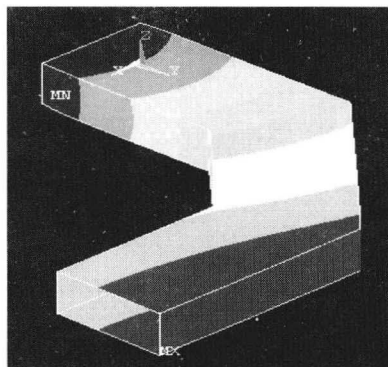


图 1-12 传输线的温度分布

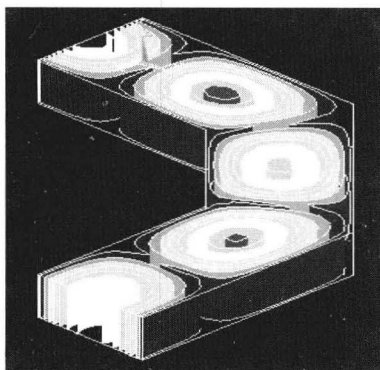


图 1-13 结构变形引起了波导模式改变

## 1.2 信号完整性与其他课程的关系

总体来说,信号完整性是属于前沿的交叉学科,涉及到电路理论、电磁理论、电磁兼容理论、微波技术、天线理论、传热学和结构力学等理论课程。要想学好它必须首先要有一定的理论基础,然后再通过大量的实践训练,否则只能是“只见树木,不见森林”。

图 1-14 为信号完整性所涉及的一些课程,虚线下为本科生期间所开设的课程,虚线上为研究生期间所开设的课程。如果缺乏相关课程的学习,在学习信号完整性之前最好将这些课程补上,或者至少要同时补修这些课程。只有这样才能加深对信号完整性的理解,才能很快进入信号完整性的前沿领域进行研究。

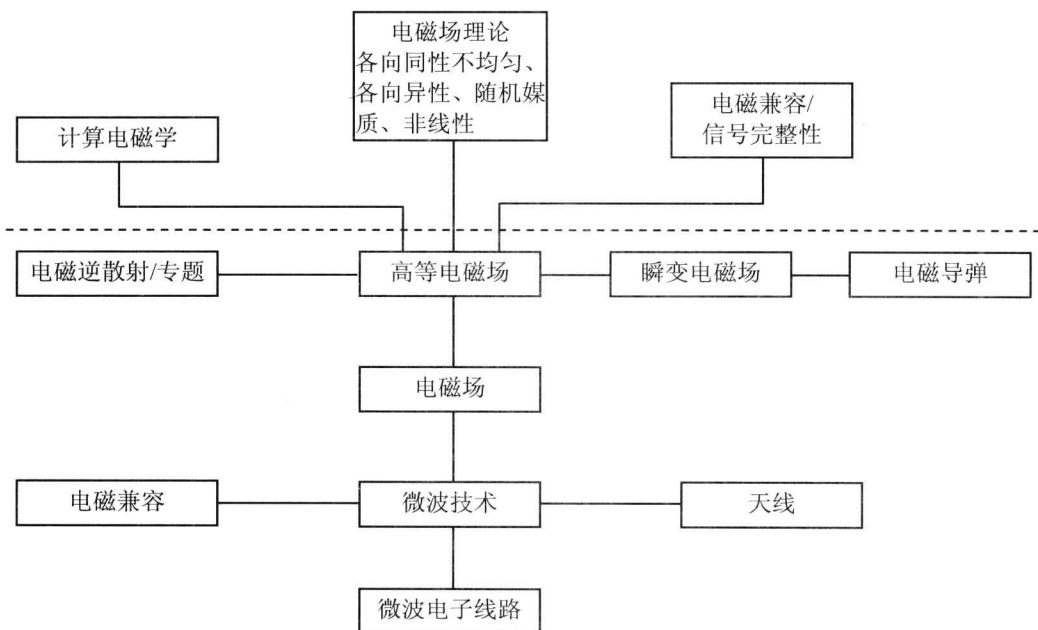


图 1-14 信号完整性涉及到的课程

## 1.3 电磁场类研究方向之间的关系

严格说来,信号完整性属于电磁兼容类的研究方向,但它与电磁兼容类研究方向又有所区别。如图 1-15 所示,如果把电磁类的研究方向分为三大类的话(这只是作者的一种分法,电磁场和计算电磁学属于这三个大方向的基础研究方向,单列),那么信号完整性介于电磁兼容和电路之间,也就是电路板上的电磁兼容问题。需要说明的是,图 1-15 所示的研究方向不是相互割裂的,而是相辅相成的、相互融合和交叉的,可以把它们看成整体去统一研究,各研究方向只是表示研究重点不同罢了。



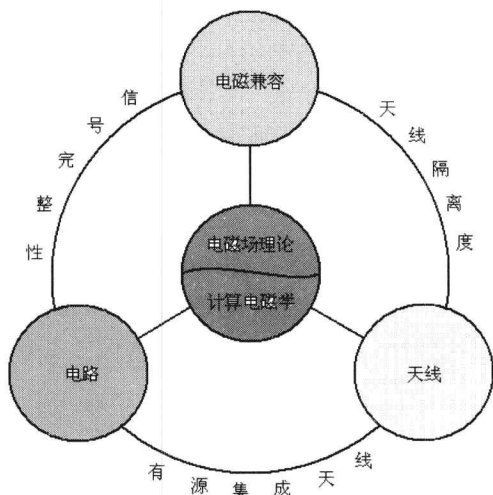


图 1-15 电磁类的研究方向

## 1.4 信号完整性与电磁兼容之间的关系

在 1.3 节谈到，信号完整性属于电路板上的电磁兼容问题，那么电磁兼容又怎样分级呢？一般认为，电磁兼容分为元器件级、电路板级、设备级、系统级，如图 1-16 所示的金字塔图。电路板级电磁兼容问题是较低层次的电磁兼容问题，很多设备级和系统级的电磁兼容问题归根结底是板级电磁兼容问题，所以板级电磁兼容问题是设备级和系统级电磁兼容问题的基础，在整个电磁兼容的研究中是很重要的。

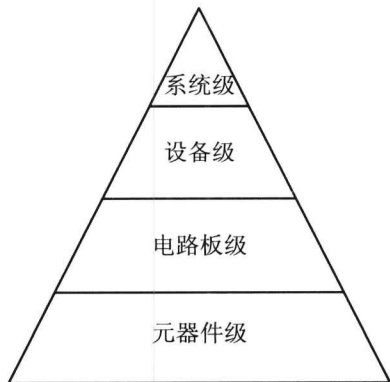


图 1-16 电磁兼容的分类

## 1.5 信号完整性与 PCB 设计之间的关系

既然信号完整性是电路板上的电磁兼容问题，那么它与电路板的设计就有关系了。在电路板的设计过程中什么情况下需要考虑信号完整性的设计呢？这就要考虑设计前的仿真问题和设计后的仿真问题。