

学校编码: 10384

分类号_____密级_____

学号: 23120070153494

UDC _____

厦 门 大 学

博 士 学 位 论 文

高速电路设计中的信号完整性问题研究

Study of Signal Integrity in High Speed Circuit Design

指导教师姓名: 陈文彦 教授

专 业 名 称: 电路与系统

论文提交日期: 2010 年 8 月

论文答辩时间: 2010 年 11 月

学位授予日期: 2010 年 月

答辩委员会主席: _____

评 阅 人: _____

2010 年 8 月

厦门大学学位论文原创性声明

本人呈交的学位论文是本人在导师指导下,独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考其他个人或集体已经发表的研究成果,均在文中以适当方式明确标明,并符合法律规范和《厦门大学研究生学术活动规范(试行)》。

另外,该学位论文为()课题(组)的研究成果,获得()课题(组)经费或实验室的资助,在()实验室完成。(请在以上括号内填写课题或课题组负责人或实验室名称,未有此项声明内容的,可以不作特别声明。)

声明人(签名):

年 月 日

厦门大学学位论文著作权使用声明

本人同意厦门大学根据《中华人民共和国学位条例暂行实施办法》等规定保留和使用此学位论文，并向主管部门或其指定机构送交学位论文（包括纸质版和电子版），允许学位论文进入厦门大学图书馆及其数据库被查阅、借阅。本人同意厦门大学将学位论文加入全国博士、硕士学位论文共建单位数据库进行检索，将学位论文的标题和摘要汇编出版，采用影印、缩印或者其它方式合理复制学位论文。

本学位论文属于：

1. 经厦门大学保密委员会审查核定的保密学位论文，
于 年 月 日解密，解密后适用上述授权。

2. 不保密，适用上述授权。

（请在以上相应括号内打“√”或填上相应内容。保密学位论文应是已经厦门大学保密委员会审定过的学位论文，未经厦门大学保密委员会审定的学位论文均为公开学位论文。此声明栏不填写的，默认为公开学位论文，均适用上述授权。）

声明人（签名）：

年 月 日

摘 要

随着现代电子技术的不断发展,高速电路的应用范围日益扩大,系统工作速率也在迅速提高。对于传输速率达几百 Mbps 甚至数 Gbps 的高速数字信号,其有效频谱已扩展至微波波段,在复杂互连系统中传输时已表现出明显的波特特性。这时互连结构的不连续及它们之间的耦合将会引起信号的延迟、反射、衰减、串扰等信号完整性问题。使得理论上可行的系统设计在实际应用中往往无法达到预期性能,甚至不能正常工作。随着系统复杂度的上升,电路板的布局布线密度也随之提高,信号完整性问题更为凸显,在国内外已受到广泛的重视,并成为一研究热点。信号完整性问题本质上是电磁场问题,本文从电磁场角度出发,深入研究了高速电路设计中存在的信号完整性问题,并得到以下研究成果:

1. 采用扩展的FDTD算法研究电源分配网络对信号完整性的影响。首先分析电源地平面间的过孔耦合,基于简化的腔体模型对分析结果进行了理论解释;提出采用短路过孔或电容器抑制电源地平面间的过孔耦合,并通过数值分析证实了该方法的可行性。分析了具有参考平面转换的微带线传输性能,发现在电源地平面的谐振频率处信号有较大的衰减,而信号过孔附近的电容器可以减小电源地平面谐振引起的信号衰减,提高信号传输质量。

2. 对严重影响系统性能的同步开关噪声进行研究,根据同步开关噪声的传播机制,提出一种蛇形桥接EBG结构。分析了蛇形桥接EBG结构的耦合因素,给出其简化的等效电路模型。采用FDTD算法对蛇形桥接EBG结构进行建模仿真,并对蛇形桥接EBG结构进行了测试。结果表明所提出的蛇形桥接EBG结构具有宽阻带,低下截止频率等优点,可以有效抑制同步开关噪声的传播。

3. 采用电磁场数值方法分析高速互连通道虽然能得到比较精确的结果,但是不能结合现有的 SPICE 软件进行系统级的信号完整性分析。采用短小均匀传输线的串接逼近互连通道中的不连续性和通道之间的耦合因素,并且从时域信号提取其参数。这种方法不仅在很宽的频带内具有较高的精度,而且具有兼容 SPICE 的特点,方便进行系统级的信号完整性分析。最后使用该方法对具有开槽参考平面的微带线及差分微带线进行信号完整性分析。

4. 针对板间电互连存在的信号完整性问题，设计了一个板间光互连验证系统。完成系统硬件平台的设计和针对板间光互连需求的互连协议设计和验证，并利用该互连协议与高层协议配合完成板间光互连通信。最后对电互连和光互连的通信性能进行了测试对比，结果表明在2.5 Gbps的通信速率下，光互连能够克服板间电互连的信号完整性问题，得到比较好的互连性能。

关键词：过孔耦合 电磁带隙 互连建模 光互连

厦门大学博硕士论文摘要库

Abstract

With the continuous development of modern electronic technology, the application range of high-speed circuits is widening and the speed of systems is also rising rapidly. For high-speed digital signals with data rate up to several hundred Mbps or even several Gbps, their effective frequency spectrum has been extended to microwave band. Then the discontinuity and coupling between the interconnect system will cause signal delay, reflection, attenuation, crosstalk and other signal integrity issues. This makes theoretically feasible system design often unable to achieve the desired performance or even can't work properly. As the system becomes more complex, the density of layout and routing in printed circuit board also rises rapidly. This makes the signal integrity issues become even more noticeable, then attracts great attention and becomes a research focus at home and abroad. Because signal integrity issues are essentially electromagnetic problem, from the electromagnetic perspective, the paper has an in-depth study on the signal integrity issues in high-speed circuit design and has the following findings:

1. The impact of PDN on signal integrity is studied based on extended FDTD algorithm. Via coupling in power/ground plane is analyzed and the theoretical explanation is presented by the simplified cavity model; A method using short-via or capacitor to suppress via coupling is proposed and verified by numerical method. Transmission performance analysis of microstrip containing reference plane change shows that the signal will have significant attenuation in power/ground resonance frequency, and capacitors near the signal via can reduce the attenuation due to power/ground resonance then improve the signal transmission performance.

2. Simultaneous switching noise having a serious impact on system performance is studied. Then a serpent line bridged EBG structure is proposed according to the transmission mechanism of simultaneous switching noise. The coupling factors of the serpent line bridged EBG structure are analyzed and a simplified equivalent circuit

model is presented. The modeling and simulation of the EBG structure is validated by FDTD algorithm. Finally, a test board is fabricated and tested. The results demonstrated that this proposed serpent bridged EBG structure is featured with wide stopband, low cutoff frequency and is able to suppress the transmission of simultaneous switching noise effectively.

3. Although using electromagnetic numerical method to analyze high-speed interconnect channel can get accurate results, it can't do system-level signal integrity analysis combined with existing SPICE software. For this problem, a broadband modeling algorithm of high-speed interconnect channel was proposed. The impedance characteristics of high-speed interconnect channel are extracted from time domain signals, then the series of short uniform transmission lines are used to approximate the channel's discontinuity and coupling factors between them. The proposed modeling algorithm not only has high accuracy in a very wide bandwidth, but also compatible with SPICE which makes it convenient to analyze system-level signal integrity. Finally, this modeling algorithm is applied in signal integrity analysis of microstrip line and differential microstrip lines with slotted reference plane.

4. For signal integrity problems in board to board interconnection, an optical board to board connection verification system is designed. The hardware design, interconnection protocol and verification for the demands of optical interconnection are presented. The optical communication between boards is made by this protocol combined with high-level protocol. Then the communication performance comparison between electrical and optical interconnection was made under test. The results show that, under the communication rate of 2.5Gbps, optical interconnection can overcome signal integrity problems caused by electrical interconnection and get a better interconnection performance.

Keywords: Via coupling; EBG; Interconnection modeling; Optical interconnection

目 录

第一章 绪论	1
1.1 课题背景及研究意义.....	1
1.2 国内外研究现状.....	2
1.3 本文的主要内容.....	4
第二章 信号完整性理论及分析方法	6
2.1 引言.....	6
2.2 信号完整性问题.....	7
2.3 高速信号互连理论基础.....	10
2.3.1 传输线理论.....	10
2.3.2 散射参数.....	12
2.4 信号完整性问题的 FDTD 分析方法.....	14
2.4.1 Yee 氏网格和迭代方程.....	15
2.4.2 数值稳定性和边界条件.....	17
2.4.3 散射参数的计算.....	18
2.5 本章小结.....	19
第三章 电源分配网络及其对信号完整性的影响	20
3.1 概述.....	20
3.2 电源分配网络模型.....	21
3.2.1 电路模型.....	21
3.2.2 基于 FDTD 的数值模型.....	25
3.3 电源地平面间的过孔耦合.....	29
3.3.1 电源地平面对过孔耦合的影响.....	29
3.3.2 过孔耦合的抑制.....	34
3.3.3 结果分析与讨论.....	38
3.4 电源分配网络对微带线信号完整性的影响.....	39
3.4.1 参考平面转换.....	39
3.4.2 具有参考平面转换的微带线.....	40
3.4.3 去耦电容的影响.....	42
3.5 本章小结.....	44
第四章 基于 EBG 结构的同步开关噪声抑制	45
4.1 概述.....	45
4.2 同步开关噪声.....	46
4.2.1 同步开关噪声模型及危害.....	46
4.2.2 传统同步开关噪声抑制方法.....	50
4.3 基于 EBG 结构的同步开关噪声抑制方法.....	51

4.3.1	EBG 结构理论.....	51
4.3.2	EBG 结构抑制同步开关噪声的原理.....	53
4.3	蛇形桥接 EBG 结构	55
4.4.1	结构设计.....	55
4.4.2	耦合特性.....	57
4.4.3	仿真与测试.....	64
4.4	本章小结	69
第五章	高速互连通道的宽频建模	70
5.1	概述	70
5.2	非均匀传输线的建模	71
5.2.1	时域反射原理.....	71
5.2.2	非均匀传输线的建模.....	72
5.3	多导体互连通道宽频建模	79
5.3.1	多导体互连通道的耦合机制.....	79
5.3.2	基于多导体传输线的耦合建模.....	81
5.3.3	多导体互连通道耦合模型的应用.....	88
5.4	本章小结	94
第六章	板间光互连系统的设计与实现	96
6.1	概述	96
6.2	板间电互连信号完整性问题及光互连技术	97
6.2.1	板间电互连的信号完整性问题.....	97
6.2.2	板间光互连技术.....	98
6.2.3	光互连协议.....	100
6.3	系统硬件平台设计	101
6.4	互连协议设计	103
6.4.1	整体构架.....	103
6.4.2	协议原语和数据帧.....	104
6.4.3	通道初始化.....	106
6.4.4	流量控制和子链路模块.....	108
6.5	系统验证与测试	111
6.5.1	互连协议验证.....	111
6.5.2	物理链路性能分析.....	113
6.6	本章小结	117
第七章	总结与展望	118
参考文献	120
攻博期间发表的论文	132
致谢	133

Contents

Chapter 1 Introduction	1
1.1 Subject Background and Significance of Research	1
1.2 Research Status at Home and Abroad	2
1.3 Main Contents of Research	4
Chapter 2 Theory and Analysis Method of Signal Integrity	6
2.1 Introduction	6
2.2 Issue of Signal Integrity	7
2.3 Basic Theory of High Speed Interconnect	10
2.3.1 Theory of Transmission line.....	10
2.3.2 Scatter Parameter.....	12
2.4 FDTD Algorithm Used in Signal Integrity Analysis	14
2.4.1 Yee Cell and Iteration Equation.....	15
2.4.2 Numerical Stability and Boundary Condition.....	17
2.4.3 Calculation of Scatter Parameter.....	18
2.5 Conclusion	19
Chapter 3 PDN and Its Impact on Signal Integrity	20
3.1 Introduction	20
3.2 Model of PDN	21
3.2.1 Lumped Circuit Model.....	21
3.2.2 Numerical Model Based on FDTD.....	25
3.3 Via Coupling in Power/Ground Plane	29
3.3.1 Impact of Power/Ground Plane on Via Coupling.....	29
3.3.2 Suppression of Via Coupling.....	34
3.3.3 Analysis and Discussion of Result.....	38
3.4 Impact of PDN on Signal Integrity of Microstrip	39
3.4.1 Reference Plane Transition.....	39
3.4.2 Microstrip Contain Reference Plane transition.....	40
3.4.3 Impact of Decoupling Capacitor.....	42
3.5 Conclusion	44
Chapter 4 Suppression of SSN based on EBG structure	45
4.1 Introduction	45
4.2 SSN	46
4.2.1 Model and Impair of SSN.....	46
4.2.2 Traditional Suppression method of SSN.....	50
4.3 Suppression Method of SSN Based on EBG Structure	51

4.3.1 Theory of EBG Structure.....	51
4.3.2 Principle of EBG Used in SSN Suppression.....	53
4.3 Serpent Line Bridged EBG Structure.....	55
4.4.1 Geometry Structure.....	55
4.4.2 Coupling Characteristic.....	57
4.4.3 Simulation and Test.....	64
4.4 Conclusion.....	69
Chapter 5 Wideband Modeling of High Speed Interconnect.....	70
5.1 Introduction.....	70
5.2 Modeling of Nonuniform Transmission Line.....	71
5.2.1 Principle of TDR.....	71
5.2.2 Modeling of Nonuniform Transmission Line.....	72
5.3 Wideband Modeling of Multi-conductor Interconnect.....	79
5.3.1 Coupling Mechanism of Multi-conductor Interconnect.....	79
5.3.2 Coupling Model Based on Multi-conductor Transmission Line.....	81
5.3.3 Application of Multi-conductor Interconnect Coupling Model.....	88
5.4 Conclusion.....	94
Chapter 6 Design and Realization of Board to Board Optical Interconnect System.....	96
6.1 Introduction.....	96
6.2 Signal Integrity of Electrical Interconnect and Optical Interconnect.....	97
6.2.1 Signal Integrity of Board to Board Electrical Interconnect.....	97
6.2.2 Board to Board Optical Interconnect Technology.....	98
6.2.3 Optical Interconnect Protocol.....	100
6.3 Design of Hardware System.....	101
6.4 Design of Interconnect Protocol.....	103
6.4.1 System Architecture.....	103
6.4.2 Protocol Primitive and Data Frame.....	104
6.4.3 Initialization of Channel.....	106
6.4.4 Flow Control and Sublink Module.....	108
6.5 Verification and Test of System.....	111
6.5.1 Verification of Interconnect Protocol.....	111
6.5.2 Performance Analysis of Physics Link.....	113
6.6 Conclusion.....	117
Chapter 7 Conclusion and Prospect.....	118
Reference.....	120
Publication List.....	132
Acknowledgements.....	133

第一章 绪论

1.1 课题背景及研究意义

信号完整性是指信号未受损伤的一种状态,代表着信号质量和信号经传输后仍然正确的功能特性。良好的信号完整性要求信号在特定的时刻以正确的时序和幅度做出响应,而当信号不具备这样的能力时,即出现所谓的信号完整性问题。从广义上讲,信号完整性问题是指在电路中互连线及其它结构引起的所有信号性能下降问题。而从本质上来说,任何信号完整性问题都可以归结为电磁场问题。在电路中具体表现为抖动、反射、近端串扰、远端串扰、同步开关噪声、地弹、电源反弹、衰减、电磁辐射、电磁干扰等^{[1][2]}。

高速电路系统是一个比较模糊的概念,通常是指电路工作信号频率达到或者超过一定的数值。但是从系统的性能考虑,并不能只关心信号本身的频率,而是应该综合考虑走线尺寸与频率的关系。当信号的传输延迟大于信号上升时间的20%时,进行布线时就应该考虑互连线的传输线效应,并进行阻抗控制和通道间耦合的抑制^[1]。当前高速通信系统及计算机系统已经进入 GHz 及以上的频率范围,在设计时必须考虑高速电路系统中的信号完整性问题。特别在系统性能要求不断提高和小型化的趋势下,信号完整性问题已经成为高速电路系统设计的一个重要瓶颈^{[3][4][5][6][7]}。虽然有些电路的工作频率不是很高,但是由于 IC 工艺的不断发展和驱动器的上升沿和下降沿从原来的几十纳秒下降到几纳秒,甚至达到皮秒级,其信号包含的频谱成份高端已经进入微波毫米波频率范围,可达几十 GHz。因此在数字电路中,如果信号上升时间与传输延迟可比性时,即使是几兆的低速信号也会产生信号完整性问题。此时电路已经属于高速电路的范畴,其信号频谱成份从直流到微波毫米波段都有分布,设计时已和微波电路无多大区别。其中对无源元件和传输线的电磁场分析更是完全相同,事实上可以认为是微波电路的超宽带情况,因此不能采用低速电路设计时的方法。

信号完整性分析的主要目的是确保电子系统工作时序的正确性,因为只有时序正确,才能够保证收发数据的正确。信号完整性问题不是单一因素造成的,而是电路板设计中的多种因素共同引起的,包括反射,振铃,地弹,串扰和同步开

关噪声等^[8]。信号完整性问题其实在很早以前已经出现^[9]，只是近年来芯片集成度提高，而体积越来越小，引脚数目越来越多，速度越来越高。导致电路的布局布线密度变大，同时工作信号频率也在不断提升，这个问题才越来越引起重视。在高速系统中，一般导线不是简单的互连线，而是成为具有分布参数的传输线。对此，电路设计工程师和电路板设计工程师都不能回避。处理好系统的信号完整性问题，是设计好高速电路系统的关键，也是保证高速系统稳定运行的前提。高速电路系统的信号互连往往比较复杂，密度大，芯片管脚数多。同步开关噪声，封装寄生效应，信号反射与串扰，多电源之间的干扰，数模混合信号之间的干扰等问题更加严重，使得理论上可行的系统设计在实际应用中往往无法达到预期效果，甚至不能正常工作。

高速电路系统有三类高密度互连形式：芯片级系统 SOC、板级系统 SOB、封装系统 SOP。而器件之间的互连可以分为四个层次：芯片内互连、芯片封装、电路板及系统级互连。在芯片级，由于亚微米和深亚微米技术的应用，晶体管和互连线相对于工作信号的波长来说还比较小。其寄生参数虽然会一定程度上影响系统的性能，但是基本上可以用一般的电路理论处理。然而随着系统工作频率的上升，芯片级的信号完整性问题也日益呈现。在多芯片组件、电路板及背板系统中，由于它们之间的互连线都比较长，且布线密度高。如果没有仔细设计可能会引起严重的信号衰减、信号抖动以及电磁干扰等多种问题。而且它们的封装结构和安装方式如屏蔽板、接地板及多层电路板中的过孔，将会产生电磁耦合并对高速信号的传输质量产生非常明显的影响。

随着高性能计算系统及通信技术的发展，对高速电路系统的需求越来越大。而信号完整性问题有其特殊的重要性，在某种程度上已成为新一代高速、超高速电路系统分析设计体系中的瓶颈，也是急需解决的难题。在传统的解决方法中，主要是靠工程师的经验以及反复的加工试验，这种方式导致系统开发成本的上升以及开发周期的延长。目前高速电路设计中的信号完整性问题在国内外已受到广泛的重视，并已成为一个研究热点。

1.2 国内外研究现状

信号完整问题研究的主要内容是电路系统中的互连结构及其它物理结构如

何影响高速信号传输。而它要解决的问题是如何设计电路系统，使之能保证良好的信号完整性。一般以麦克斯韦电磁场理论和传输线理论作为研究信号完整性问题的理论基础，并衍生出不同的分析方法。尽管电磁场理论已经发展得比较完善，但是高速电路设计的信号完整性分析和设计仍然没有比较好的系统解决方案。

近年来，在信号完整性的电磁场数值分析方法中，时域有限差分法 (Finite Difference Time Domain, FDTD) ^[10] 受到广泛的重视。该方法把空域划分为很多网格并在时域也划分成许多步长，然后用数值方法求解 Maxwell 方程组。由于是直接求解电磁场方程，只要网格划分足够细，对各种复杂的几何结构或介质分布构成的系统原则上均能得到比较精确的解。FDTD 的缺点是耗用计算机资源 (内存和时间) 大，但随着计算机性能的迅速提高以及计算机并行算法和其它改进算法的发展，上述问题正在得到逐步解决。FDTD 对高速电路的电磁特性分析主要包括信号完整性分析、电磁干扰和电磁兼容 (EMI/EMC) 分析。文献^[11]采用 FDTD 算法应用于复杂封装中的超高速互连和电磁兼容问题的研究，通过实验和数值计算研究了基底集成波导，并对其优化使之用于超高速数字互连系统中。文献^[12]采用 FDTD 研究了具有不连续参考平面的互连线信号完整性问题，并结合传输线理论给出了线电容电感以及衰减因子的解析形式。有关信号完整性的研究还涉及高速互连的信号传播特性和各种不连续性^[13]，如互连线传输特性^[14]、差分线^[15]、过孔^[16]、通道耦合^[17]、开槽平面 (非理想返回路径) ^[18] 等。此外，利用数值方法提取结构的等效电路后，可以利用多种电路分析方法和现有的电路分析软件对高速互连结构进行分析。Stefan Zaagc 和 Enno Groteluschen^[19] 等人对高速互连结构的高频特性进行比较深入的研究，指出高速电路中的互连线阻抗矩阵 Z_c 以及传输常数 Y 都会随着频率的变化而变化。Kim 提出使用 AWE 来获取线性 RLC 传输线的时域宏模型^[20]，Eisenstadt 通过把 S 参数变换为 Z 参数提取互连结构的 RLC 模型^[21]。文献^[22]报道了用全波仿真器提取出散射参数后，将其作为电路的网络端口，然后利用 SPICE 电路仿真器分析各种互连的不连续性。在高速电路系统制造之前，有必要对高速信号在互连结构中传输时的反射、通道耦合等信号完整性问题进行详细的分析。如果能采用 SPICE 或 IBIS 电路仿真器进行系统级别的信号完整性分析可以更好地预测系统性能^{[23][24]}。因此上述研究成果也为信号完整性分析提供了一个比较好的研究方向。此外，文献^[25]将电磁场仿真和电路仿真结合起来同时进

行信号完整性分析，不过这种方法不能分析比较复杂的电路。

在高速电路板中不同结构之间会产生电磁场耦合，且随着布局布线密度的上升，互连结构之间形成的三维结构越来越复杂。针对具体互连结构产生的信号完整性问题，也进行了大量的研究。文献^[26]对可工作在 10Gbps 传输速率以上的接地共面波导(GCPW)进行了分析。差分传输方式具有抗噪声、低反射的优点，是高速电路中常用的互连形式。文献^[27]介绍了一种可用于多层高速互连的新型双绞差分微带线，不过这种结构比较复杂，给实际布线带来一定难度。文献^{[28][29]}分析了差分微带线的阻抗匹配、延迟及衰减等基本信号完整性问题，并给出工程经验公式。文献^{[30][31]}对互连结构中的过孔、跳变/拐角等不连续性问题进行了研究。文献^{[32][33][34]}研究了高速系统中多电源、分裂地平面和互连线接触电阻对信号完整性的影响。文献^[55]研究了同步开关噪声的建模以及预测方法。

相对国外而言，国内有关高速电路设计中的信号完整性问题研究和应用比较滞后。国内只有少数几家公司和高校开展这方面的研究，企业如深圳华为^[36]，深圳中兴，武汉烽火^[37]等；高校如西安电子科技大学，东南大学，中国科技大学。在高速电路系统信号完整性问题的基础研究方面，曾获得 2004 年国家自然科学奖的上海交通大学李征帆教授等，在高速电路系统规模扩大、速度提高的情况下，对其中的互连封装系统产生的寄生电磁效应进行研究，取得了一系列的发现和創新^{[38][39][40]}。其研究成果被该领域有影响的专著“Transmission Line and Lumped Circuits”多次引用，甚至将其计算结果作为比较标准。

由于高速电路中信号的快速变化，其含有的频率从直流一直到微波毫米波。而且大多数高速电路系统互连结构复杂，给分析带来了很大的困难。尤其是在一些多层板中，由互连线、过孔和电源/地平面形成的各种不均匀、三维立体结构更是缺乏广泛深入的研究。高速电路设计中的信号完整性还是一门尚未成熟的学科，虽然在国内外已有信号完整性问题的相关理论、仿真软件和建模方法，但是由于其分析方法和应用都没有很好的系统框架，因此还处于不断探索的阶段。

1.3 本文的主要内容

本文的主要内容有以下 5 点：

- 1、 介绍高速电路设计中出现的反射、串扰、同步开关噪声及电磁干扰

等信号完整性问题产生的原因及其危害。给出用于描述高速电路中互连线的传输线方程及高速电路设计中常用的几种传输线结构。为了表征高速电路设计中的信号完整性问题，通过波的概念引入散射参数，它为描述信号完整性问题提供了一个强有力的工具。最后讨论用于进行信号完整性分析的时域有限差分法，并给出从时域有限差分法计算散射参数的方法。

2、首先讨论电源分配网络的电路模型及其对信号完整性的影响。采用等效电流源法扩展了时域有限差分法。基于扩展的时域有限差分法分析电源地平面物理参数对过孔耦合的影响，并基于简化的腔体模型对分析结果进行了理论解释；提出采用短路过孔或电容器提供低阻抗路径抑制谐振引起的过孔耦合，并通过数值分析证实了该方法的可行性。最后研究了电源分配网络中的电源地平面和去耦电容对具有参考平面转换的微带线传输性能影响。

3、基于 MOS 输出驱动器讨论同步开关噪声的成因及危害，比较现有抑制同步开关噪声方法的优缺点。分析了 EBG 结构用于抑制同步开关噪声的原理以及现有的 EBG 结构。提出一种蛇形桥接 EBG 结构，分析了蛇形桥接 EBG 结构的耦合因素，给出其简化的等效电路模型。采用时域有限差分法对蛇形桥接 EBG 结构进行了建模仿真，并对蛇形桥接 EBG 结构进行测试。

4、首先介绍现有高速互连通道建模方法及其优缺点。基于时域反射原理从时域信息获得信号路径上的阻抗特性，并采用均匀传输线的串接对非均匀传输线进行建模，得到兼容 SPICE 的宽频模型。采用基于时域信息的互连通道建模方法不仅可以包含信号路径上的不连续因素，而且包含了多导体通道之间的耦合。由于模型的基本单元为均匀传输线，因此具有兼容 SPICE 的特点。最后使用该建模方法分析了具有开槽参考平面的微带线及差分微带线的传输性能及串扰问题。

5、首先讨论了板间电互连的信号完整性问题及板间光互连的优势和存在的问题。设计了一个板间光互连系统，完成系统硬件平台的设计和针对板间光互连需求的互连协议设计和验证。并利用该互连协议与高层协议配合完成板间光互连通信。最后对电互连和光互连的通信性能进行了测试对比，结果表明在 2.5 Gbps 的通信速率下，光互连能够克服板间电互连的信号完整性问题，并得到比较好的互连性能。

Degree papers are in the "[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)". Full texts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to etd@xmu.edu.cn for delivery details.

厦门大学博硕士论文摘要库