

高速接口故障波形形态分析

胡 星¹ 邱继顺¹ 袁珩洲² 李少青²

(湖南大学信息科学与工程学院 长沙 410082)¹ (国防科学技术大学计算机学院 长沙 410073)²

摘 要 随着数据处理能力的不断提高,高速接口应用越来越广泛。高速接口的测试难度较大,需要依靠工程师的经验和较长时间的分析才能确定故障的类型和位置。通过故障状态下高速接口的波形形态分析,确定了故障与故障波形之间的对应关系,降低了故障分析定位代价。实验系统以实际 PCIE IP 核构造了片间传输逻辑结构,利用 SPICE 模拟器模拟出了各种故障下的波形形态,形成了故障字典。

关键词 高速接口,故障,波形,分析

中图分类号 TP306 文献标识码 A DOI 10.11896/j.issn.1002-137X.2014.12.003

Fault Waveform Morphology Analysis about High Speed Interface

HU Xing¹ KUANG Ji-shun¹ YUAN Heng-zhou² LI Shao-qing²

(College of Information Science and Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)¹

(School of Computer Science, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)²

Abstract With the increasing improvement of the data transfer rates, the application of high speed interface is more and more widely used. Testing of high speed interface is difficult, and engineer's experience plays the critical role in analyzing and diagnosing the fault type and location. Through the waveform morphology analysis of high-speed interface in the fault state, the corresponding relation between fault and fault waveform was determined and the cost of fault analysis was reduced. The experimental system in real PCIE IP core constructs logical structure between transmissions. Using the SPICE simulator, we simulated various fault waveforming morphology and forming the fault dictionary.

Keywords High-speed interface, Fault, Waveform, Analysis

集成电路不断向前发展,为了提高数据的传输速率,芯片设计中越来越多地使用高速接口,这为电路的测试带来了很大的挑战。一般而言,为集成电路增加边界扫描设计可以提高其可测性,IEEE1149.6 提出了面向高速数字网络的边界扫描设计标准,按照该标准给芯片增加边界扫描结构就可以对其进行故障测试与诊断^[1]。但扫描结构的增加一方面会给芯片实际工作带来影响,另一方面也增加了芯片的面积。若芯片没有边界扫描设计,它是通过在电路中预留测试点,借助于高带宽示波器、逻辑分析仪等多种仪器来实现的^[2],测试时需要依靠工程师的经验和较长时间的分析才能确定故障的类型及位置。就高速接口而言,信号传输时不同部位故障导致的信号形态也不相同。基于此,本文对交流耦合和差分信号进行了研究,以实际 PCIE IP 核为构件,构造了片间传输逻辑结构。利用 SPICE 模拟器对其中存在的故障进行模拟分析,通过实验得出故障波形的分类,形成故障字典。该方法降低了故障分析定位代价,在实际工程测试中有一定的参考实用价值。

1 高速信号传输与故障

高速信号在传输过程中以模拟信号的形式存在,采用差

分通道进行传输。信号由发送器发送,经过差分后传输到接收器,最终转换成单端信号送入芯片内部。但是信号在传输过程中,不可避免地存在各种故障导致传输错误,包括开路故障、短路故障等。

1.1 高速信号传输

高速信号一般以交流耦合信号以及差分信号的形式进行传输^[3]。信号传输由 3 部分组成:差分信号发送器、差分信号互联器、差分信号接收器,如图 1 所示。

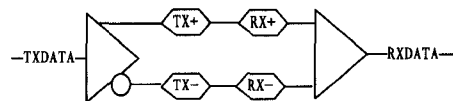


图1 高速信号传输的差分通道

差分信号与传统的一根信号线一根地线(即单端信号)走线的做法相比,优点如下^[4]:

- 抗干扰能力强。干扰噪声一般会等值、同时地被加载到两根信号线上,而其差值为 0,即噪声对信号的逻辑意义不产生影响。
- 能有效抑制电磁干扰(EMI)。由于两根传输线靠得很近且信号幅值相等,这两根线与地线之间的耦合电磁场的幅

到稿日期:2013-06-25 返修日期:2013-08-16 本文受超级计算机处理器研发(2013ZX01028001-002)资助。

胡 星(1989—),女,硕士,主要研究领域为集成电路测试,E-mail:huxing890521@hnu.edu.cn;邱继顺(1959—),男,博士,主要研究领域为集成电路测试;袁珩洲(1989—),男,硕士,主要研究领域为数模混合集成电路设计;李少青(1963—),男,研究员,主要研究领域为集成电路设计与测试。

值也相等,同时它们的信号极性相反,其电磁场将相互抵消,因此对外界的电磁干扰也小。

• 时序定位准确。差分信号的接受端是两根传输线上的信号幅值之差发生正负跳变的点,并将其作为判断逻辑 0/1 跳变的点,可以准确定位时序。而普通单端信号以阈值电压作为信号逻辑 0/1 的跳变点,因而受阈值电压与信号幅值电压之比的影响较大,不适合低幅度的信号。

1.2 故障

本文主要处理的是交流耦合或差分通道中的故障。这些故障可能由于种种原因,比如差分结构中存在的直流分量对故障的掩盖作用等,难以被检测。表 1 列出了 IEEE1149. 6 标准中可检测的部分故障^[5]。针对可能存在的这些故障进行模拟与分析。

表 1 可检测的故障

编号	故障位置
1	发送器 TX 引脚 1 断开
2	电容 C1 引脚 2 断开
3	接收器 RX 引脚 1 断开
4	发送器 TX 引脚 1 短接到电源
5	发送器 TX 引脚 1 短接到地
6	发送器 TX 引脚 1,2 短路
7	电容 C1 引脚 1,2 短路
8	电容 C1 引脚 1 与 C2 引脚 2 短路
9	接收器 RX 引脚 1 短接到电源
10	接收器 RX 引脚 1 短接到地
11	接收器 RX 引脚 1,2 短路
12	R 引脚 1 开路

2 基于 PCIE IP 核的实验电路的构建

目前业内主要的高速接口有 PCIE、DDR3 等,它们可以将数据传输速率提升到一个很高的频率。高速接口芯片采用的是高速通信,在数据的发送端通过差分信号将数据发送,数据在通道中以交流信号的方式存在;在数据的接收端,差分信号被转换成单端信号送入到芯片内部。文中实验系统以实际高速接口 PCIE IP 核构建了片间传输的逻辑结构,如图 2 所示,图 2 中包含有发送器 TX 和接收器 RX,该结构采用差分信号传输数据。

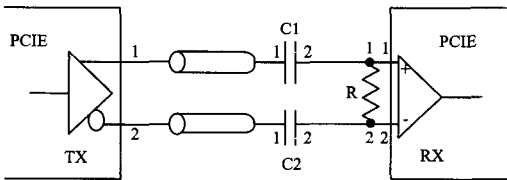


图 2 片间传输逻辑

数据在传输过程中以交流信号进行传输,噪声等因素的干扰使得信号出现衰减甚至错误。同时,在接收端和发送端之间也会出现硬件故障,造成数据传输错误,如缺少电容、信号线短路或者开路、差分信号线间的短路等。以上种种因素使得设计的难度增大,为保证电路上传输的数据的正确性和可靠性,真正实现数据的高速传输,文中对信号传输过程中存在的故障进行模拟与分析。

3 故障波形形态模拟与分析

针对差分交流信号的测试,对图 2 的高速接口 PCIE IP

核构建的片间传输的逻辑结构用 SPICE 模拟器进行模拟并对其进行分析。

3.1 故障波形形态模拟

从图 2 可以看到, TX 的引脚 1 是发送器的正引脚, TX 的引脚 2 是发送器的负引脚,在电路的发送端施加 2. 5GHz 频率且占空比为 50% 的测试激励,经过 SPICE 模拟器进行模拟,在接收器的正负引脚 rxp_0、rxm_0 可以看到仿真波形。如图 3 所示的无故障时的仿真波形记为波形 0。

从图 2 可以看出,在接收器和发送器之间进行信号传输时,会有电容、电阻等器件的作用,在接收器接收到的信号是一组交流信号,因为电容起到隔直流的作用,所以传输过来的信号如图 3 所示。其中横坐标表示时间,纵坐标表示电压。图中以 19. 998us 为时间起点,因为此时波形已稳定。

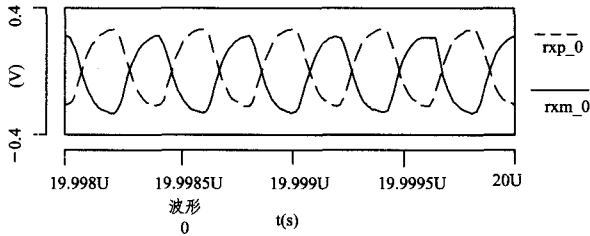


图 3 正常的无故障的波形图

对图 2 的片间传输逻辑加载故障,并进行模拟。故障 1、2、4、5 的波形形态类似,如图 4 波形 1 所示;故障 3、10 的波形形态类似,如图 4 波形 2 所示;故障 7 的波形如图 4 中波形 3 所示;故障 9 的波形如图 4 中波形 4 所示;故障 12 的波形图与正常无故障的波形图类似。

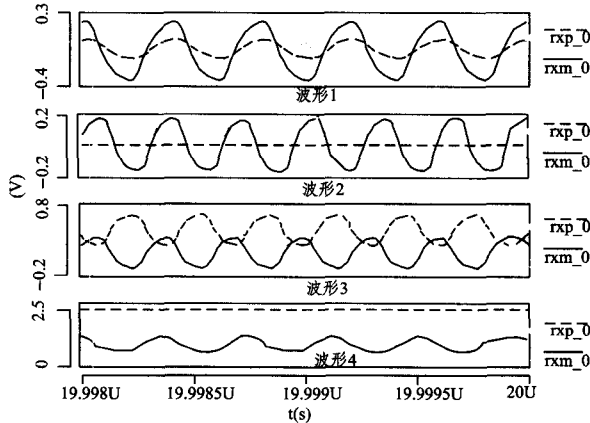


图 4 故障波形图

而故障 6、11 的波形形态类似,其总体趋势如图 5 所示,记为波形 5;故障 8 的波形的总体趋势如图 6 所示,记为波形 6。

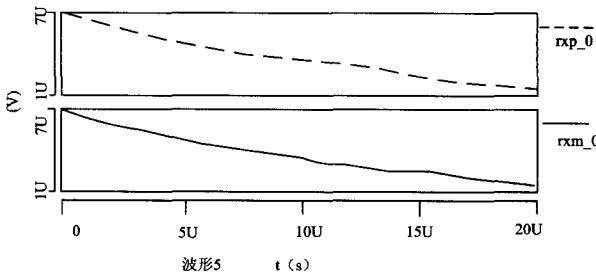


图 5 故障 6、11 的波形图

- [16] Florea M C, Joussemle A L, Bosse E, et al. Robust combination rules for evidence theory[J]. Information Fusion, 2009(10): 183-197
- [17] Fu Chao, Yang Shan-lin. Analyzing the applicability of Dempster's rule to the combination of interval-valued belief structures [J]. Expert Systems with Applications, 2011, 38(4): 4291-

4301

- [18] Chao Fu, Yang Shan-lin. Group consensus based on evidential reasoning approach using interval-valued belief structures[J]. Knowledge-Based Systems, 2012, 35: 201-210
- [19] 寻二辉, 任趁妮. 一种改进的冲突证据融合方法[J]. 计算机科学, 2012, 39(11): 31-38

(上接第 12 页)

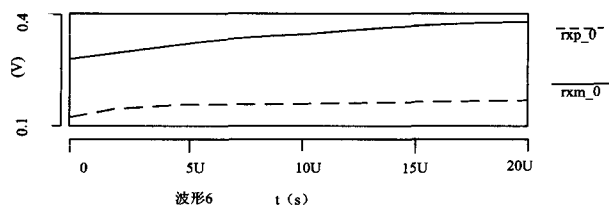


图 6 故障 8 的波形图

3.2 故障波形形态分析

对于故障 1、2、4、5, rxm_0 引脚的波形图与正常无故障时类似, 而 rxp_0 引脚的波形与无故障时的走向一致, 但幅度有所减小。对于故障 1 和 2, 由于 TX 同相端失去信号驱动, 但 TX 反相端的交流电流仍可达到接收端, 因此信号幅度减小, 相位相同; 对于故障 4 和 5, 由于 TX 同相端被上拉/下拉至电源/地, 接收端失去该端交流信号驱动, 而改为被 TX 反相端驱动, 因此信号的表现与故障 1 和 2 相类似。

对于故障 3、10, rxm_0 引脚的波形图与正常无故障时类似, 而 rxp_0 引脚的电压始终保持为 0V, 接收端失去交流信号驱动, 从而出现一端固定另一端为有效信号的波形。

对于故障 7, 从发送端到接收端存在单边直流信号通路, rxm_0 引脚与 rxp_0 引脚的共模电压不同, 且 rxp_0 达到波峰时 rxm_0 处于波谷, rxm_0 达到波峰时 rxp_0 处于波谷。

对于故障 9, rxm_0 引脚的波形图走向与正常无故障时一致, 只是共模比无故障时高, 而 rxp_0 引脚的电压始终保持为 2.5V。

对于故障 6、11, rxm_0 引脚的波形图与 rxp_0 引脚的波形图重叠, 完全一致, 由于没有有效信号驱动, 波形表现为无规律形象。

对于故障 8, 从驱动端到接收端之间存在一条直流信号通路, rxm_0 引脚的波形图与 rxp_0 引脚的波形无交点, 且一定时间后都趋于稳定。

对于故障 12, 该类故障的波形与正常无故障时类似, 因此可能从波形形态上无法检测该类故障, 但在实际测试中, 该故障可能导致接受器的双端转单端的输出得不到差分信号, 该类故障的检测有待进一步研究。

最终形成的故障字典如表 2 所列。

表 2 故障字典

编号	故障
波形 0	无故障、故障 12
波形 1	故障 1、2、4、5
波形 2	故障 3、10
波形 3	故障 7
波形 4	故障 9
波形 5	故障 6、11
波形 6	故障 8

3.3 实际测试

对实际 PCIE IP 核进行实测, 通过专用的接口测试卡, 借助于高带宽示波器来采集接口信号波形, 分析接口的正确性。在示波器上看到的接收器正负引脚的波形如图 7 所示。其中实线为 RX- 的波形, 虚线为 RX+ 的波形。可以看到, 图 7 与模拟得到的图 3 一致, 由此验证了无故障时模拟的正确性。但由于往实际 PCIE IP 核注入故障较困难, 因此没法一一验证各种故障情况下的波形形态。SPCIE 模拟是比较精确的, 能保证得到的波形的正确性。

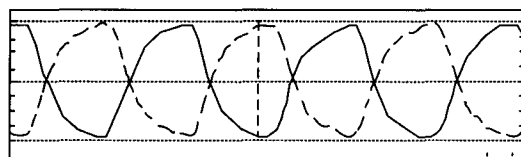


图 7 RX 端的实测波形

将多组信号进行叠加之后得到如图 8 所示的眼图。

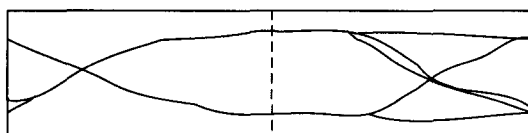


图 8 实测时的眼图

结束语 随着数据传输速率的不断提高, 高速接口的应用越来越广泛, 其在处理交流差分信号时表现出了优势。本文以实际高速接口 PCIE IP 核构建了片间传输的逻辑结构, 通过对该结构进行 SPICE 模拟, 得出各种故障下的波形形态, 形成了故障字典。分析表明, 这些故障共分为 7 类, 实际检测时可将检测波形与文中所列的故障波形形态进行对比, 查看故障字典, 进而判定故障的类型, 这降低了故障分析定位代价, 为实际故障检测提供了参考。

参考文献

- [1] 王石记, 徐鹏程, 杜影. 适用于高级数字网络测试的边界扫描芯片特性研究[J]. 计算机测量与控制, 2010, 18(10): 2234-2235, 2284
- [2] 雷加, 刘华林. 高级数字网络的边界扫描测试[J]. 电子测量与仪器学报, 2004, 18: 21-25
- [3] Johnson H, et al. 高速信号传输[M]. 邓晖, 译. 北京: 电子工业出版社, 2012
- [4] 维基百科. 差分信号[OL]. 2013-6-14[2013-6-15]. <http://zh.wikipedia.org/wiki/%E5%B7%AE%E5%88%86%E4%BF%A1%E5%8F%B7>
- [5] IEEE Std 1149. 6-2003, IEEE Standard for Boundary-Scan Testing of Advanced Digital Networks[S]. IEEE, 2003