

信号完整性测试基础

在当今快速发展的数字时代，高速传输已成为电子设备的基本要求。随着数据传输速率的不断提升，信号完整性 (Signal Integrity，简称SI) 问题变得越来越重要。信号完整性是高速互连系统设计的基石，高速系统的信号完整性直接关系到数据传输的可靠性和系统的整体性能。因此，深入理解信号完整性的基本原理和测试方法对于确保高速系统的稳定运行至关重要。

信号完整性基本概念

信号完整性的定义

信号完整性 (Signal Integrity，SI) 是指一个信号在电路中产生正确的响应的能力。在长距离、高比特率的信号传输中，由于多种效应的影响，信号的可信度会降低。因此，高速互连系统里的数据传输对信号完整性的要求越来越高。

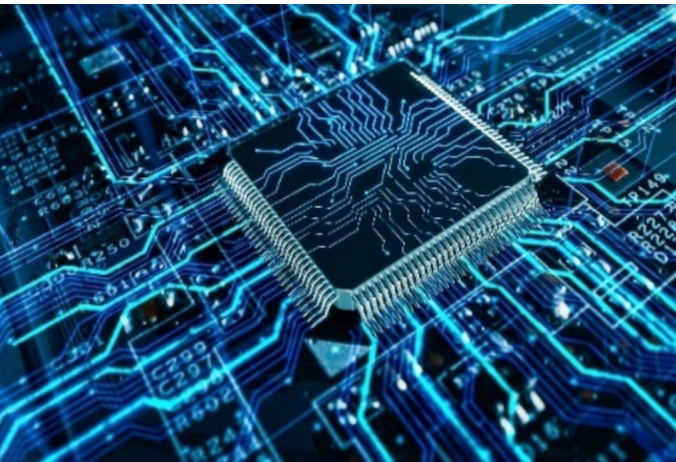


图1：信号完整性对高速信号的有效传输至关重要

信号完整性测试的重要性

在高速数据传输中，信号完整性测试的重要性不言而喻。如果信号在传输过程中出现问题，如衰减、反射、失真等，将会导致数据传输错误，甚至系统崩溃。因此，通过信号完整性测试，可以确保信号在传输过程中保持正确的形态和幅度，从而提高数据传输的可靠性和稳定性。

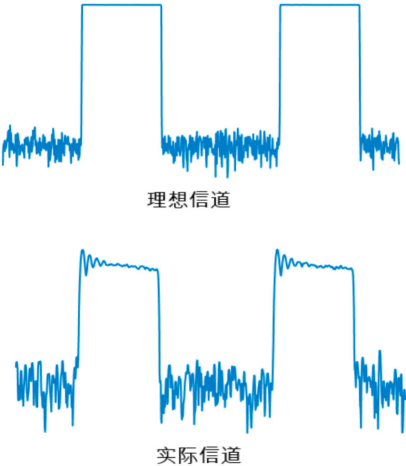


图2：理想传输信道 Vs 实际传输信道



影响信号完整性的核心因素

信号在传输过程中会受到多种因素的影响，导致信号的失真和降级。这些因素包括阻抗失配、衰减/损耗、串扰和抖动噪声等。

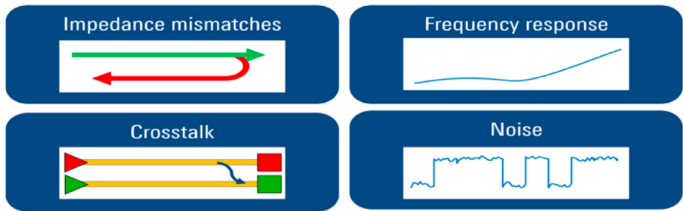


图3：影响信号完整性的核心因素

1、阻抗失配

- 物理表现：当信号通过传输线遇到阻抗突变 (如过孔、连接器或线宽变化) 时，部分能量会反射回源端，形成振铃 (Ringing)或过冲 (Overshoot)。
- 影响：反射信号与原始信号叠加导致接收误判逻辑状态 (如将“0”误判为“1”)。

2、衰减/损耗

- 插入损耗 (Insertion Loss) 随频率升高快速增长，例如在10 GHz时，FR4板材的损耗可达-2 dB/inch。
- 物理表现：趋肤效应 (Skin Effect)：高频电流集中在导体表面，增加导体的有效电阻。介质损耗 (Dielectric Loss)：高频电场使PCB基板材料 (如FR4) 分子极化，产生热量并削弱信号。
 - 影响：信号高频分量衰减导致上升时间延长，眼图闭合。

3、串扰 (Crosstalk)

- 串扰强度与走线间距的平方成反比，例如PCB间距增加1倍，串扰降低约4倍。
- 影响：近端串扰 (NEXT)：干扰信号与主信号在同一端口出现。远端串扰 (FEXT)：干扰信号在传输线远端叠加。
 - 成因：相邻走线间的互容 (Capacitive Coupling) 和互感 (Inductive Coupling) 所导致。

4、抖动噪声 (Jitter)

- 抖动通常由RJ和DJ组成。由抖动造成的噪声会干扰信号的传输，导致信号质量下降。
- 分类：随机抖动 (RJ)：由热噪声等随机因素引起，符合高斯分布。确定性抖动 (DJ)：由周期性干扰 (如电源噪声、时钟偏移) 引起。
 - 影响：总抖动超过信号单位间隔 (UI) 的20%时，误码率会显著上升。

高速互连系统的构成

高速互连系统通常由发射机 (Tx)、接收机 (Rx) 和通道 (Channel) 三个关键部分组成。发射机负责将数字信号转换为适合在通道上传输的模拟信号。接收机负责接收通道传输的模拟信号，并将其转换为数字信号。通道是发射机和接收机之间的物理连接，通常由PCB、高速线缆和连接器组成，它主要负责高速信号的传输工作。

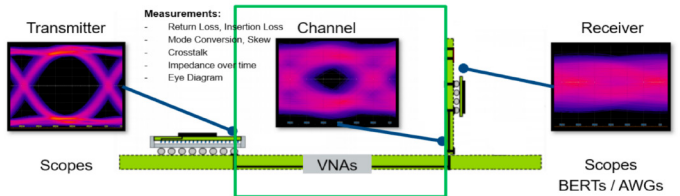


图4：高速互连系统的构成示意

► 发射机

发射机是高速信号传输系统的起点，它负责生成并发送信号。在发射机中，信号经过调制、放大等处理后，通过输出口发送到通道中。

发射端常用预加重 (Pre-emphasis) 技术补偿高频损耗。例如PCIe Gen5发射机通过增强第一个比特的幅度来抵消通道衰减。

► 通道

通道是信号传输的媒介，它可以是PCB上的走线、连接器或电缆等。在通道中，信号会受到衰减、串扰、色散效应和阻抗失配等因素的影响，导致信号失真。

在进行通道设计时，需要充分考虑阻抗匹配、衰减特性以及频率响应等因素。

► 接收机

接收机是高速信号传输系统的终点，它负责接收并解码信号。在接收机中，信号经过放大、滤波等处理后，通过输入端口送到后续电路中进行处理。

接收端通过集成均衡器 (Equalizer) 修复信号畸变，如连续时间线性均衡器 (CTLE) 和决策反馈均衡器 (DFE)。

信号完整性测量与评估

为了评估高速系统的信号完整性，需要采用一系列测量技术和评估指标。这些技术和指标包括眼图分析、误码率测试 (BERT)、频域S参数以及时域反射特性 (TDR) 等。

► 眼图分析

眼图分析是一种常用的信号完整性评估方法。它通过将高速数字信号的1、0和相应转换叠加在一起，形成类似眼睛的波形，从而评估信号的失真程度。眼图开口越大，表示信号质量越高；眼图闭合或模糊则表示信号质量较差。通过眼图分析，可以直观地了解信号在整个传输链路中的失真情况，为优化系统设计提供依据。

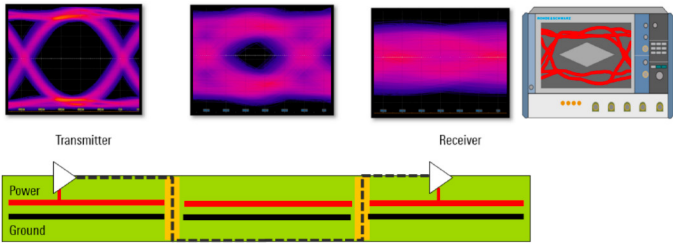


图5：高速传输链路的眼图分析示意

► 误码率测试 (BERT)

误码率测试是一种通过发送已知模式的信号并检测接收端错误来评估系统性能的方法。在BERT测试中，发射机发送一系列已知模式的信号 (如伪随机二进制序列PRBS)，接收机接收并解码这些信号，然后统计接收到的错误码数。通过计算误码率 (即错误码数与总码数之比)，可以评估系统的性能稳定性。误码率越低，表示系统性能越稳定。

► 频域S参数

散射参数 (S参数) 是描述网络端口之间传输和反射特性的参数。在高速系统中，S参数可以用于评估通道的性能和阻抗匹配情况。通过测量S参数，可以了解通道的频率响应、衰减特性以及反射系数等信息。这些信息对于优化通道设计、提高信号完整性具有重要意义。

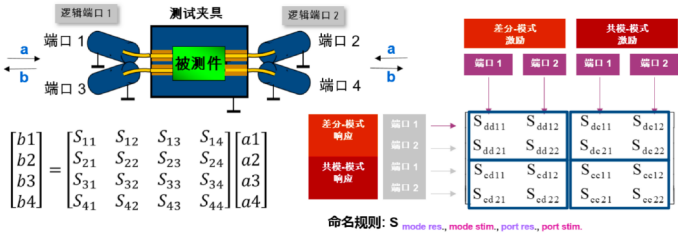


图6：单端S参数和混合模S参数的端口对应关系

S_{dd21} (差分插入损耗)：反映信号从差分端口1到差分端口2的传输效率，测量带宽通常需覆盖信号基频（来奎斯特频率）的1.5-2倍，具体要求视产品标准而定。

S_{cd21} (共模转换)：衡量差分信号转换为共模噪声的能力，这项参数的测量数值通常需要低于-30 dB以抑制EMI影响

► 时域反射特性 (TDR)

时域反射是一种用于测量通道阻抗变化和距离信息的方法。在TDR测试中，通过分析反射信号的波形和时间延迟，可以了解通道的阻抗变化和距离信息。TDR测试还可以用于定位通道中的故障点 (如开路、短路等)，为通道的优化设计提供依据。

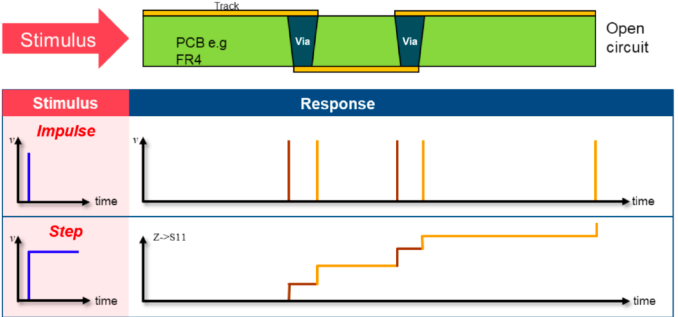


图7：高速传输链路的TDR分析示意

案例分析与实践应用

以高速串行通信接口为例，如PCIe5.0/6.0、IEEE 802.3ck/dj等接口对数据传输速率有着极高的要求。在设计这些接口时，需要充分考虑信号完整性问题。

具体来说，需要采用阻抗匹配技术来减小反射现象的发生，需要采用预加重/去加重技术来补偿高频成分的衰减。需要采用差分信号传输来提高信号的抗干扰能力和信号完整性，同时还需要采用先进的测试技术和评估指标来验证系统的性能稳定性。

案例一：眼图闭合

- 现象：接收端眼图水平闭合，误码率升高。
- 诊断：通道高频衰减导致上升时间延长。
- 解决方法：发射端启用预加重 (增强前几个比特的高频分量)。接收端配置CTLE均衡器，提升高频增益。

案例二：PCB近端串扰超标

- 现象：相邻信号线间串扰达-25 dB，超出设计规格 (-30 dB)。
- 诊断：走线间距不足 (例如仅2倍线宽)。
- 解决方法：重新布线，将间距增至3倍线宽以上。在走线间插入接地屏蔽线。

案例三：PCB高频衰减过大

- 现象：趋肤效应和介质损耗导致高频分量衰减，眼图闭合。
- 诊断：板材选择不恰当，其在高频时的损耗太大。
- 解决方法：使用低损耗PCB板材。发射端预加重或接收端均衡 (如CTLE、DFE)。

总结

随着数据传输速率的不断提升和新技术的发展，信号完整性将面临更多挑战和机遇。未来，我们需要不断探索新的测试技术和设计方法，以满足更高性能的系统需求。以确保高速电子系统的稳定运行和高效传输。

工程师通过精确建模 (如S参数仿真)、严格测试 (如眼图与BER分析、TDR和S参数测试) 及针对性优化 (如预加重和均衡技术)，能够有效应对高频衰减、串扰和反射等挑战。

未来，随着数据传输速率向更高速率演进，信号完整性技术将持续推动通信、计算和消费电子领域的创新。

罗德与施瓦茨 (中国) 科技有限公司

800-810-8228 400-650-5896

info.china@rohde-schwarz.com

www.rohde-schwarz.com.cn

官方微信



官方视频号



环境承诺

- 能效产品
- 持续改进环境现状
- 有保证的ISO 14001环境管理体系

R&S®是罗德与施瓦茨公司注册商标

商品名是所有者的商标 | 中国印制

版本01.00 | 2025年5月

信号完整性测试基础

文件中没有容限值的数据没有约束力 | 随时更改