

矢量网络分析仪在高速线缆信号完整性测试中的应用研究

王琨

中电科思仪科技股份有限公司, 山东 青岛 266000

摘要 : 本文旨在探索矢量网络分析仪在高速线缆信号完整性测试中的应用。高速线缆信号完整性测试是电子产品设计和开发过程中非常重要的一环, 能够评估线缆传输性能和识别潜在的信号问题, 以确保高质量的数据传输。矢量网络分析仪能够精确测量线缆的传输性能并识别潜在的信号问题, 对于确保高速数据传输的可靠性和稳定性具有重要意义。

关键词 : 矢量网络分析仪; 高速线缆; 信号完整性测试; 传输性能; 解决方案

Application Research of Vector Network Analyzer in Signal Integrity Test of High-speed Cable

Wang Kun

Ceyear Technologies Co., Ltd, Shandong, Qingdao 266000

Abstract : The purpose of this paper is to explore the application of vector network analyzer in high-speed cable signal integrity testing. High-speed cable signal integrity testing is a very important part of the electronic product design and development process, which can assess the cable transmission performance and identify potential signal problems, so as to ensure high-quality data transmission. Vector network analyzers can accurately measure the transmission performance of cables and identify potential signal problems, which is important to ensure the reliability and stability of high-speed data transmission.

Key words : vector network analyzer; high-speed cable; signal integrity testing; transmission performance; solution

引言

随着现代通信技术的迅速发展, 高速线缆在各种领域中的应用变得越来越广泛, 例如数据中心、无线通信系统、航空航天等。然而, 高速线缆传输过程中存在着诸多问题, 如信号传输的时延、噪声、信号衰减等, 这些问题可能对系统性能产生严重影响。因此, 进行高速线缆信号完整性测试变得至关重要。矢量网络分析仪 (Vector Network Analyzer, VNA) 是一种用于信号完整性测试的关键工具, 它能够精确测量高频信号在系统中的传输特性, 包括反射损耗、传输损耗、相位衰减等。具备高速、高精度和高灵敏度的特点, 使得 VNA 成为高速线缆信号完整性测试中不可或缺的设备。

一、矢量网络分析仪的意义

- 提高信号传输质量: 通过研究矢量网络分析仪在高速线缆信号完整性测试中的应用, 可以帮助我们准确地分析和评估信号传播特性, 从而优化线缆设计和信号传输系统, 提高信号传输质量。
- 探索信号传输损耗机制: 通过研究不同高速线缆中的信号传输损耗, 在 VNA 的帮助下可以精确测量和分析信号在线缆中的衰减情况, 从而深入了解线缆的信号传输损耗机制, 为优化线缆设计提供理论依据。
- 促进高速通信技术发展: 研究矢量网络分析仪在高速线

缆信号完整性测试中的应用, 有助于推动高速通信技术的研发和应用。通过深入理解信号传输特性, 可以优化线缆设计和系统集成, 提高高速通信系统的性能和可靠性。

二、矢量网络分析仪的原理与应用

矢量网络分析仪 (Vector Network Analyzer, 简称 VNA) 是一种广泛应用于电信领域的精密测试工具, 用于高速线缆信号完整性测试以及其他射频和微波组件的性能评估。仪主要由合成源、信号分离装置、接收机、数字化处理器、显示以及电源等部分组成。测试技术与设备 31 (总第 299 期) 电子工业专用设备

Equipment for Electronic Products Manufacturing EEPM Apr. 2023 组成。合成信号源输出信号，经信号分离装置的电子开关、功分器等部分将信号分成 2 路，一路是端口输出激励信号；另一路是参考信号 R，将其输送至接收机。^[1]该设备通过测量和分析信号在电子器件和线缆中的传输特性，如幅度、相位和立体角度等，为电信系统的设计和维护提供关键的数据。

矢量网络分析仪的工作原理基于 S 参数测试技术，其中 S 参数表示传输线上电压和电流之间的关系。S 参数包括两个组件：幅度 S21 和相位 S21。幅度 S21 衡量了输入和输出信号之间的传输损耗，而相位 S21 衡量了信号的相对延迟。通过测量和分析 S 参数，VNA 可以准确地评估电子器件的传输性能。

矢量网络分析仪的应用：

用于各种高速线缆的信号完整性测试，例如在数据中心或通信基站中使用的光纤、同轴电缆以及微带线等。通过对线缆的 S 参数进行精确测量，VNA 可以帮助工程师评估信号的衰减、串扰和反射等效应，从而确保线缆在高速数据传输中的可靠性。

矢量网络分析仪还应用于射频和微波组件的性能评估。例如，它可以测量天线的增益和驻波比，评估滤波器的频率响应，确定功率放大器和混频器等器件的线性和非线性特性。通过 VNA 提供的准确测量结果，工程师可以优化设计和调整参数，以提高系统的性能和效率。

还可应用于存储目标曲线，将改造后的曲线数组重新写回网络分析仪，就可显示目标曲线。同时可将其写入内部的非挥发性存储器，从而长期保留目标曲线，实现对其方便灵活的控制。^[2]

三、高速线缆信号完整性测试中的相关研究

大多数电子系统产品，当时钟频率超过 100 MHz，或者上升边小于 1 ns 时，信号完整性就变得十分重要，通常将这种情况称为高频领域或高速领域。从广义上讲，信号完整性是指在高速产品中由互连线引起的所有问题。^[3]

1. 高速信号传输理论和技术：传输信号之间的连接称为传输线。传输线作为信号传输的载体，是用于引导和传输能量和电磁波信息的设备。当信号穿过许多传输链路结构时，其信号变化与它所经过的路径密切相关。该信号不仅对闭环控制中的可见电阻，电容，电感和其他常规组件起反应，还会与某些由导体和介质组成的系统相互作用。因此，对传输线的透彻了解是理解和解决信号完整性问题的基础。^[4]研究高速信号传输的理论基础和关键技术，包括信号传输的编码、调制、解调和时钟恢复等。通过对高速信号传输模型的分析和建模，可以提高线缆信号完整性测试的准确性和可靠性。

2. 线缆特性分析方法：研究如何通过矢量网络分析仪来测量和分析线缆的特性参数，包括传输损耗、传输延迟、噪声和串扰等。通过分析线缆的特性参数，可以评估线缆的信号传输性能，为线缆的优化设计提供指导。

3. 信号完整性分析技术：研究如何通过矢量网络分析仪来评估高速信号在线缆中的完整性，包括信号的波形畸变、时钟抖动

和眼图等。通过对信号完整性的分析，可以及时发现线缆中的问题并进行故障排除，保证信号传输的可靠性和稳定性。

4. 高速线缆优化设计方法：研究如何通过矢量网络分析仪对线缆进行参数优化设计，以提高信号传输的质量和速度。通过分析线缆的特性参数和信号完整性，可以确定最佳的线缆材料、布线方案和信号传输参数，从而提高整个系统的性能。

四、矢量网络分析仪的选择与参数设置

选择矢量网络分析仪的时候，应该考虑以下几个因素：

1. 频率范围：根据你的研究需要，选择适合的频率范围。确保所选矢量网络分析仪的上限频率高于你所要测试信号的最高频率。

2. 动态范围：矢量网络分析仪的动态范围越宽，测试结果越准确。因此，选择具有较高动态范围的矢量网络分析仪能够更好地评估信号完整性。

3. 焦耳热噪声：焦耳热噪声对于高频信号测试至关重要。选择低噪声的矢量网络分析仪，可以提高测量结果的精度。

4. 接口类型：确保所选矢量网络分析仪的接口类型能够与你所测试线缆的接口类型兼容。

参数设置建议：

1. 带宽设置：根据你所测试信号的最高频率，设置矢量网络分析仪的带宽。确保带宽足够宽以满足信号频率的要求。

2. 采样点数：根据你的测试需求和信号特性，设置适当的采样点数。更高的采样点数可以提供更精确的测试结果，但也会增加测试时间。

3. 平均次数：根据测试信号的稳定性，设置适当的平均次数。平均多次测试结果可以降低噪声对测试结果的影响，提高测试精度。

4. 参考平面：确保设置正确的参考平面，以准确测量信号的特性。

五、高速线缆的信号电性能测试结果

当高速数字系统间需要进行短距离高速通信，需要利用高速线缆对系统进行连接，为了满足系统间高速大数据交换的要求，对高速线缆中差模和共模两种信号的传输性能提出了很高的要求。特别地，当高速线缆中传输的信号的上升沿时间进一步缩短，线缆本身需要对高频信号保持良好的传输性能。然而很多在低频上对线缆传输性能影响很小的因素随着频率的增加表现出越来越显著的影响。由此在设计线缆的过程中，能事先把握这些因素的影响具有现实意义。^[5]

1. 带宽测试：通过使用矢量网络分析仪，我们可以在高速线缆上进行频带测试，以确定其可传输的最高频率范围。测试结果会显示带宽范围内频率的响应情况，可以帮助我们判断线缆的频率响应能力。

2. 插入损耗测试：使用矢量网络分析仪可以测量高速线缆

在信号传输过程中的插入损耗。在测试中，仪器将发送和接收信号，在两端测量信号的功率差异，并计算出线缆的插入损耗。这个测试结果可以帮助我们评估线缆的信号衰减情况。

3. 反射损耗测试：矢量网络分析仪还可以用于测量高速线缆的反射损耗。测试中，仪器发送一个信号，并测量信号的反射程度，以确定线缆的反射损耗指数。这个测试结果可以帮助我们评估线缆的信号反射性能。

4. 互耦测试：在高速线缆中，互耦会影响信号传输的完整性。矢量网络分析仪可以用于测量高速线缆中的互耦电容和电感。通过测试互耦参数，我们可以判断线缆对信号串扰的抑制能力。

5. 串扰测试：线缆中的信号串扰是影响信号完整性的一个关键因素。使用矢量网络分析仪可以测量线缆中的信号串扰电容和电感，以评估线缆在传输过程中的信号干扰程度。

六、线缆参数与信号完整性之间的关系

线缆参数是指线缆的特性，包括但不限于电阻、电容、电感、传输损耗等性质。而信号完整性表示信号在传输过程中是否能够保持其原始的质量和特性。

线缆参数与信号完整性之间存在着紧密的关系。线缆的参数能够直接影响信号的传输质量和性能。线缆参数与信号完整性之间的关系：

1. 电阻：线缆的电阻对信号传输的影响较大。当线缆的电阻较大时，信号在传输过程中会受到较大的衰减，导致信号的幅度降低，同时还会产生较大的功耗。因此，较低的电阻可以使信号传输的损耗更小，从而提高信号的完整性。

2. 电容：线缆的电容会影响信号的上升时间和下降时间。当线缆的电容较大时，信号在传输过程中会受到较大的延迟，并且信号的上升时间和下降时间会变慢，使得信号的完整性受到了一定的影响。因此，合理控制线缆的电容可以提高信号的完整性。

3. 电感：线缆的电感会影响信号的带宽和传输速率。当线缆的电感较大时，信号的带宽会受到限制，从而导致传输速率的降低，影响信号的完整性。因此，较小的电感可以提高信号的完整性。

4. 传输损耗：线缆的传输损耗指的是信号在传输过程中的能量损失。如果线缆的传输损耗较大，信号的幅度会降低，从而影响信号的完整性。因此，降低传输损耗可以提高信号的完整性。

七、不同条件下的信号完整性比较分析

1. 不同传输距离下的信号完整性比较分析：通过在不同传输距离下使用矢量网络分析仪进行测试，比较信号的幅度衰减、相位变化和时域波形失真等指标的变化情况。根据测试结果，评估信号完整性对传输距离的依赖关系，并提出相应的优化方案。

2. 不同频率下的信号完整性比较分析：在不同频率范围内，使用矢量网络分析仪测试信号的参数，如频率响应、频率衰减和相位延迟等。对比不同频率下信号完整性表现，探讨信号的频率特性对完整性的影响，并提出相应的改善策略。

3. 不同线缆材料和结构下的信号完整性比较分析：通过使用矢量网络分析仪测试不同材料和结构的线缆传输性能，比较不同线缆对信号的影响。评估不同材料和结构对信号完整性的敏感性，并提出选择合适线缆的建议。

4. 不同环境条件下的信号完整性比较分析：在不同环境条件下，如温度、湿度和电磁干扰等，使用矢量网络分析仪测试信号完整性。分析不同环境对信号完整性的影响，并提供相应的环境适应性优化方案。

八、未来研究方向

1. 研究更为精确的高速线缆信号完整性测试方法，结合矢量网络分析仪和其他先进的测试设备，提升测试的准确性和有效性。

2. 进一步研究矢量网络分析仪的改进和优化，开发更为高效、便携的测试设备。

3. 探究线缆的材料和结构对信号完整性的影响，通过改良线缆设计和制造工艺，提高线缆的传输性能。

4. 进一步探索矢量网络分析仪在其他领域的应用，如无线通信、天线测试等，提升测试技术的广泛适用性。

九、结束语

矢量网络分析仪能够提供高精度的测量结果，可以有效地测量信号传输时的频率响应、阻抗匹配、相位延迟等参数。这对于确保信号的稳定传输至关重要，尤其在高速数据传输中。矢量网络分析仪具有良好的灵活性和多功能性。它可以应用于各种不同类型的线缆系统，如同轴电缆、通信电缆和高速数据线缆等。同时，它还能够进行多种测试，如S参数测量、时域测量和频域测量，以满足不同测试需求。矢量网络分析仪具有高效性和可靠性。它能够快速完成测试，并提供可靠的数据分析结果。这使得我们能够及时发现并解决线缆系统中的问题，提高其性能和可靠性。矢量网络分析仪在高速线缆信号完整性测试中的应用研究具有重要的意义。通过合理利用矢量网络分析仪，我们能够更好地评估线缆系统的质量，帮助提升数据传输的可靠性和效率。

参考文献

- [1] 姜峰. 矢量网络分析仪的研究与应用 [C] // 航空工业测控技术发展中心, 中国航空学会测试技术专业委员会, 《测控技术》杂志社. 面向航空试验测试技术——2013年航空试验测试技术峰会暨学术交流会论文集. 测控技术编辑部, 2013: 4.
- [2] 朱兴华, 何为. 矢量网络分析仪在高速PCB材料评估中的应用 [J]. 印制电路信息, 2012(06): 64-66.
- [3] 李运卿. 通信系统中高速线缆和高速连接器电磁兼容仿真设计与应用研究 [D]. 浙江大学, 2022. DOI: 10.27461/d.cnki.gzjdx.2021.001689.
- [4] 朱忠义. 矢量网络分析仪的功能扩展与应用 [C] // 教育部中南地区高等学校电子电气基础课教学研究会. 教育部中南地区高等学校电子电气基础课教学研究会第二十届学术年会会议论文集 (下册). [出版者不详], 2010: 3.
- [5] 徐孺. 基于HDMI 2.1高速电路的信号完整性设计和仿真分析 [D]. 东南大学, 2022. DOI: 10.27014/d.cnki.gdnau.2021.003136.