



利用高频采样技术进行高速差分阻抗测试

谷水泉

(北京海洋兴业科技股份有限公司 北京 102200)

摘要: 本文介绍了利用高频采样技术进行高速差分阻抗测试的方法和解决方案。首先,通过定义传输差分阻抗的概念,说明了其在电路和通信系统设计中的重要性。然后,介绍了高频采样技术的原理和特点,以及高频差分探头的作用和优势。接下来,详细探讨了利用高频采样示波器进行 TDR (时域反射) 测试的原理和方案,并与传统的矢量网络分析仪进行对比。

关键词: 差分阻抗测试; 高速传输总线; 信号完整性; 采样示波器; 高频差分探头; 矢量网络分析仪

1 引言

随着电子器件的不断发展和通信系统的不断进步,对于高速差分信号传输线(如 CAN 总线、FlexRay 总线)的差分阻抗精确测量和分析变得越来越重要。差分阻抗是衡量传输线匹配程度的关键参数,而传统的测量方法往往无法满足高速差分信号的要求。因此,需要一种高效、准确的测试方法来评估差分阻抗并检测传输线上的故障或不匹配。

本文将详细介绍高频采样技术在高速差分阻抗测试中的应用。首先,我们将阐述传输差分阻抗的定义和重要性,以及通过矢量网络分析仪测试的局限性。接着,我们将介绍高频采样技术的原理和特点,以及高频差分探头在测试中的作用。然后,我们将重点介绍利用高频采样示波器进行 TDR 测试的步骤和计算方法,并对比矢量网络分析仪的优缺点。

通过本文的研究和讨论,相信读者将更加深入地了解高频采样技术在高速差分阻抗测试中的重要性 and 应用价值,为电路和通信系统设计提供更准确、可靠的测试手段。

2 传输差分阻抗定义

在电路设计和信号传输中,差分阻抗是一个重要的概念。差分阻抗指的是两个相互独立但有相关性的导线(或传输线)之间的阻抗。它是指在差模模式下测量的输入和输出之间的阻抗。

差分信号是一种通过两个互补信号来传输信息的方法。其中一个信号为正向信号,另一个信号为反向信号。这两个信号具有相等的幅度但极性相反如图 1 所示。差分信号在许多应用中被广泛使用,例如高速差分总线、差分放大器、差分时钟等。

差分阻抗是指在差分信号传输中两个信号引脚或导线之间的阻抗如图 2 所示。它考虑了两根导线之间的相互影响和耦合效应,以及与周围环境的电磁相互作用。

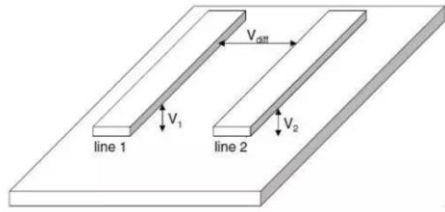


图 1 差分信号

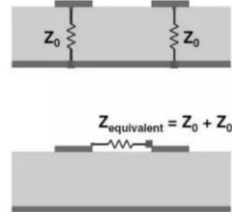


图 2 等效差分阻抗

在高速数字电路和数据传输中，保持适当的差分阻抗是至关重要的。如果差分阻抗不匹配或存在阻抗不连续的情况，会导致信号失真、串扰和干扰，从而影响数据的正确传输和解读。因此，在设计和制造过程中，需要特别注意确保传输线的阻抗一致性和匹配性。下图 3 为传输线上阻抗不连续等效模型。

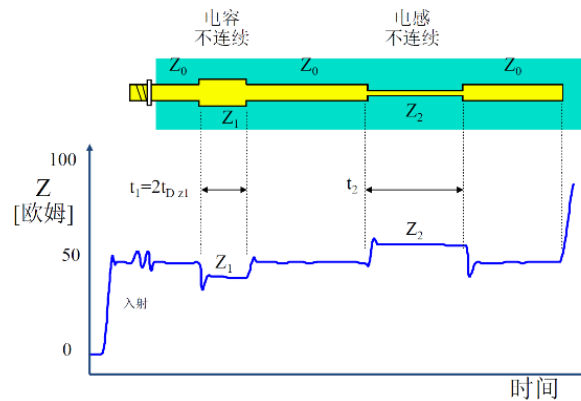


图 3 传输线上的阻抗不连续

对于高速数据通信系统，合理选择和控制差分阻抗可以最大限度地提高信号完整性、减少信号失真和串扰，从而保证可靠的数据传输。因此，在设计和制造传输线时，必须对差分阻抗进行精确的测试和控制，并根据需要采取相应的措施进行调整和优化。

3 测试技术及解决方案

3.1 高频采样技术

高频采样示波器是用于捕获和分析重复的周期信号仪器。其原理基于时域采样技术，它通过对连续信号进行离散化采样，并将采样数据转换为可视化的波形以供观察和分析，图 3 为高频采样示波器原理框图。

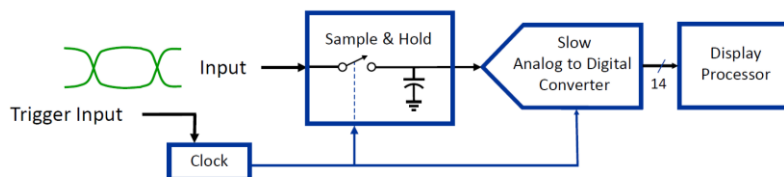


图 4 采样示波器采样原理框图



高频采样示波器通过高速采样和数据处理来捕获和分析被测物体上的反射信号。它使用采样触发技术记录每个采样点的电压，并将这些采样点组合成波形图。通过对采样波形的分析，可以确定反射的时间延迟、幅度变化以及其他相关参数，从而获得有关被测物体的信息，高频采样技术的采样示波器具有以下优势：

- 1) 高精度测量：高频采样技术可以提供更高的测量精度，能够准确测量线缆上微小的阻抗变化；
- 2) 宽频带范围：高频采样技术适用于广泛的频率范围，由于采样芯片前面没有模拟放大电路，不会限制信号宽带，所以可以实现超高的测量宽带和信噪比；
- 3) 快速测试速度：通过高性能的硬件组件（快速 ADC、高速接口等）和优化的算法可以加速数据采集、处理和显示过程，从而实现更快的测试速度。

3.2 高频差分探头

作为信号与示波器的连接通道，探头同样重要，高频差分探头尖端由两个相互平衡的探针组成见图 5，其中一个探针连接到传输线的正极，另一个连接到负极。这样就可以同时测量两个导线之间的差分信号，而不受环境噪声和共模干扰的影响。

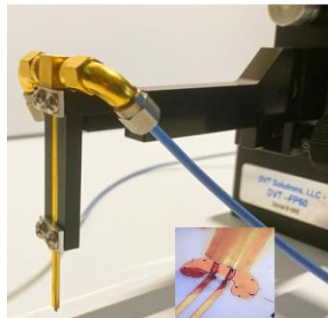


图 5 高频差分探头外观（DVT30 差分探头）

高频差分探头在印刷电路板、无源电路板和总线线缆等测试中具有精确且可重复的 TDR 测试优势，易于探测非常小的测试垫，采用镀金导电金刚石尖端穿透表面氧化物以实现可靠的重复测量见图 6，并且真差分设计无需接地，减少干扰和误差。

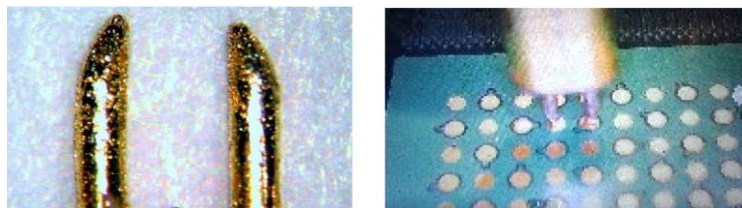


图 6 镀有 4/6um 导电金刚石的探头尖端（DVT30 差分探头）

3.3 解决方案

本方案通过高频采样示波器搭配高频差分探头进行高速差分阻抗测试，利用时域反射



(TDR) 的原理，向被测 DUT 注入一对差分脉冲信号，通过信号在线缆上的反射特性来检测线路中的故障或不匹配。当一个突变（例如开路、短路或阻抗不匹配等）出现在传输线上时，信号会发生反射并返回到源端。通过测量反射信号的时延和振幅，可以确定故障位置、性质以及传输线的特性。

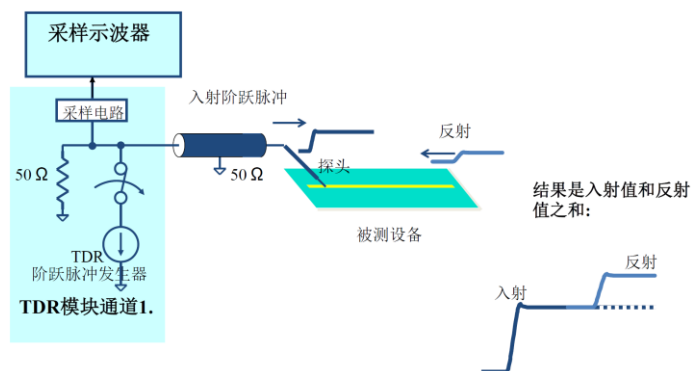


图 7 高频采样示波器 TDR 测试原理框图

由上文可知，当阶跃脉冲被注入到被测线路上时，如果存在阻抗不连续点，就会产生反射。反射系数 (Reflection Coefficient) ρ 是用来描述反射信号与入射信号之间的关系参数。它可以通过测量反射信号幅度与入射信号幅度之比来计算得到。

假设源阻抗为 Z_0 ，被测点阻抗为 Z_L ，测量反射信号电压为 V_r ，入射信号电压为 V_i ，则反射系数 ρ 的计算公式为：

$$\rho = (V_r / V_i) * (-Z_0 / Z_L)$$

其中，负号表示反射方向相反。如果反射系数为正，表示反射波与入射波同相位，说明被测点的阻抗较低；如果反射系数为负，表示反射波与入射波反相位，说明被测点的阻抗较高。

根据反射系数 ρ ，可以通过解反射系数的方程来计算被测点的阻抗 Z_L 的大小。具体计算方法可能因实际情况而有所变化，但原理是通过测量反射信号相对于入射信号的幅度和相位差来推导得到。

下图 8 展示了使用英国 PICO 9000 系列采样示波器搭配高频差分探头进行 PCB 差分阻抗测试。其等效采样率高达 15TS/s 以及 25G 带宽，通过 16 位 ADC 分辨率，能够捕捉微小的阻抗变化并提供精确的测量结果。通过高频采样示波器，可以直观地观察到电压、阻抗或反射系数曲线随时间或距离的变化，从而更好地理解被测物体的特性。



图 8 PICO 9311-20 采样示波器 TDR 测试接线及测试结果图

4 应用范围

利用高频采样技术进行差分阻抗测试适用于各种类型的线缆，包括但不限于：

- 高速数字信号传输线缆，如 HDMI、USB、以太网等；
- 高频无线通信系统中的天线馈线；
- 数据中心和服务器中的高速数据线缆；
- 汽车电子系统中的信号传输线缆。

通过对这些线缆进行差分阻抗测试，可以评估其性能指标，并及早发现潜在问题，确保设备和系统的高可靠性和稳定性。

5 高频采样示波器与矢量网络分析仪比较

传统上，矢量网络分析仪一直是高频阻抗测试的主要工具。然而，随着高频采样示波器的出现，工程师们现在拥有了更多的选择。下面将比较这两种方案在原理、应用场景和阻抗测试范围方面的差异。

	采样示波器	矢量网络分析仪
测试原理	以阶跃脉冲信号激励，进行时域反射测量	以正弦波形信号激励，进行频域分析，通过测量被测设备的响应来获得时域响应
应用场景	电子、通信、射频领域	微波组件、射频电路和系统
阻抗测试范围	相对灵活，适用于不同阻抗范围	适用于接近 50Ω 或 75Ω 的情况

6 结论

根据北京某研究所提出的测试需求，北京海洋兴业科技股份有限公司工程师提出了一种解决差分阻抗测试问题的方法，解决了 100Ω、120Ω 特征阻抗差分双绞线的测试问题。通过 TDR（时域反射）测试技术。引入了高频采样示波器作为新的解决方案。通过这套测试系



统，很好地解决了非 50Ω 、 75Ω 特征阻抗测试的需求。这一创新性的方案可以提供更准确和可靠的测试结果，为相关领域的工程师和研究人员带来更多可能性。

通过高频采样技术进行线缆差分阻抗测试无疑是一种准确、快速的解决方法。它在各个领域的应用帮助我们确保系统性能和信号完整性，提高产品质量和可靠性。随着科技的不断创新和发展，我们可以预见高频采样技术在电子测试领域的进一步应用扩展，为电子设备和通信系统的发展带来更多机遇和挑战。

@本文由北京海洋兴业科技股份有限公司编写，如需转载，请注明出处。