

使用差分探头进行单端测量



简介

近年来，由于引入了高速差分信号，数字通信领域的技术发生了变化。差分信号曾经只限于通常与长距离外部接口相关的特殊应用，但现在几乎应用于所有主流计算机接口。串行 ATA 的目标是成为主流数据存储器接口；FB-DIMM 旨在成为主流内存接口；而 PCI Express 则要成为计算机处理器板上的主流 I/O 通信接口。所有三种计

算机接口新标准都是在物理层通过差分信号进行点到点的、数吉比特的串行数据通信。

高速测量探头技术已从以单端接地为基准的有源探头向有源差分探头迁移，因此向差分信号的迁移也顺理成章。通常，差分探头不仅在测量差分信号时使用更加方便，而且能提供更卓越的测量性能。因此，现在引入的众多高性能探头都是差分而非单端设计就不足为奇了。

使用差分探头进行单端测量

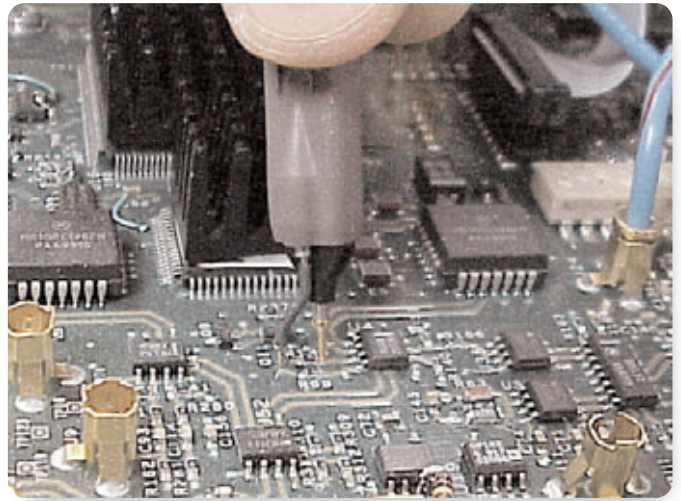
► 应用文章

尽管差分信号正变得越来越普遍，但对单端测量的需求却仍然很大。由于差分信号实际上是由两个互补的单端信号组合而成，因此仍需要对差分信号进行单端测量。对差分信号进行单端测量可以测量信号的共模响应，也可以检查一对信号中是否存在不对称，而不对称过量会导致差分响应出现问题。幸运的是，差分探头可以灵活地进行单端测量。实际上，在很多方面，差分探头所进行的单端测量更优于单端探头。本文将分析差分探头在对差分信号进行单端测量时的使用，并探讨进行此类测量时出现的测量问题。

示波器探头设计

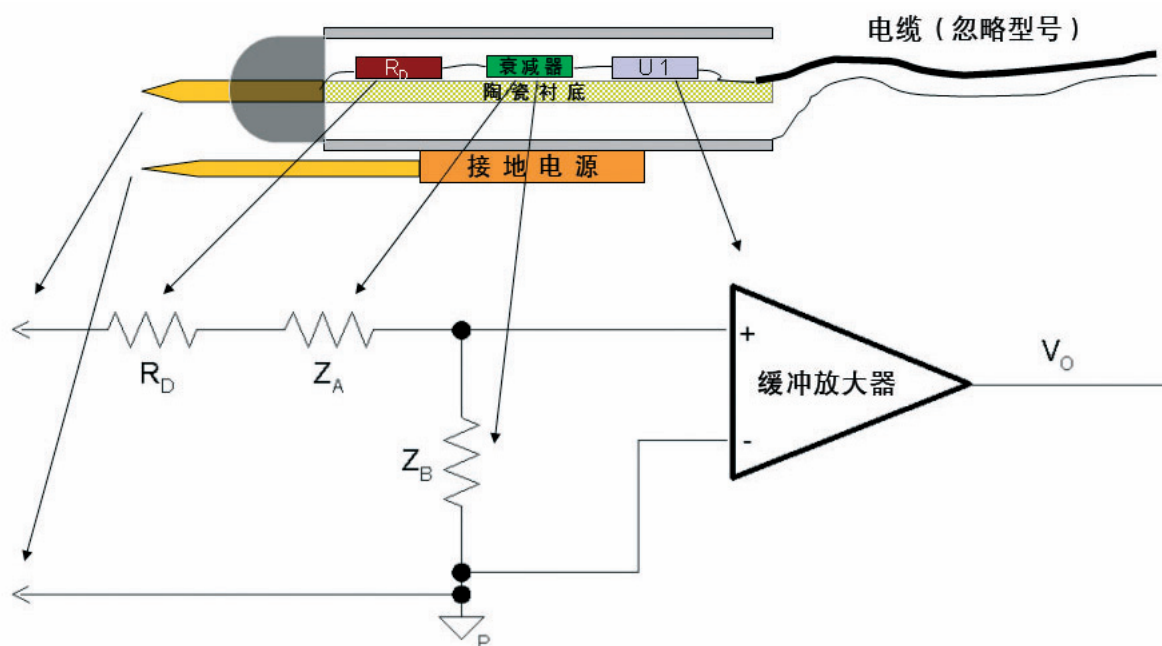
示波器探头是从示波器前面板输入连接接口到待测电路的一段设备/工具，可以扩展示波器的测量性能。作为下列互联机制的一部分，一个高性能的示波器探头可提供几项重要功能，有助于保持测量的保真度：

- 使用高带宽和线性响应将信号传输到主示波器
 - 在探头端部进行信号缓冲，以降低电路负载
 - 沿着探头传输路径进行信号屏蔽，减少了外部噪声的干扰
 - 信号互联的方式灵活，便于使用；与探头电路的连接可靠
- 由于探头对高带宽和低噪声性能的要求，所有示波器探头的设计都基于使用同轴电缆进行信号传递。由于同轴电缆具有均匀的传输线结构，因而比简单的电缆互联提供了更高的频率响应。此外，同轴电缆具有内在的电屏蔽功能，有助于降低来自外部源的噪声干扰。典型的探头设计包括用于电路连接的探头端部、用于信号传递的同轴传输线以及用于与示波器前面板连接器连接的探头控制接口。



► 图 1. 带 Z 地线 (196-3488-00) 探测电路板的 P7240 单端探头。

多年来，示波器探头的设计不断发展，以满足不断增长的测量性能需求。早期的探头设计主要使用无源电路技术，以便接入高阻抗的示波器信道输入端。因为高阻抗无源探头受限于 500 MHz 左右的带宽，而低阻抗无源探头可能无法接受直流信号负载，因此无源探头设计限制了当今的高速应用技术，故本文不予探讨（有关无源探头的更多信息请参阅 www.tek.com 的入门文章“ABCs of Probes”）。本文着重探讨有源探头的设计和测量，特别是从单端到差分探头体系结构的迁移。



► 图 2. 单端有源探头的简化模型。

有源探头在探头端部使用缓冲放大器，以降低探头负载并驱动 50 欧姆的探头同轴传输线。探头同轴传输线终接到在示波器前面板连接器后的垂直通道预放大器的 50 欧姆输入端。单端有源探头设计用于参照接地信号测量，其探头端部有两个输入，一个信号输入和一个接地。图 1 所示为 Tektronix P7240 型号的图片，该型号是 4 GHz 单端有源探头，带有灵活可变间距的地线，用于与电路接地端相连。P7240 探头的输入连接插座带有信号引脚和接地触点。使用插座可便于更换受损的信号输入引脚，灵活选择接地点。但遗憾的是，传统插座结构中固有的寄生效应限制了在高带宽探头设计中使用插座。单端探头上所使用的接地类型也是测量时保持良好信号保真度的一个关键因素，对此随后将进行详细探讨。

图 2 所示为传统单端有源探头的简化模型。该模型显示了典型单端有源探头的关键元件：

- 一个用于连接待测电路的输入信号引脚
- 一个接地点，用于与探头衰减器、缓冲放大器和电缆屏蔽物进行内部连接
- 一个探头输入阻尼电阻器，以提高高频时的探头输入阻抗，减弱探头谐振电路问题
- 一个具有高直流输入阻抗、宽频带性能和偏置电压控制的补偿衰减器，和用于动态范围扩展的偏置电压控制
- 一个具有低输入电容、宽频带性能的探头缓冲放大器，高电流输出以驱动探头电缆传输线
- 一根探头同轴电缆，一般至少为一米长，以便接入信号并向主示波器提供高性能信号传输

使用差分探头进行单端测量

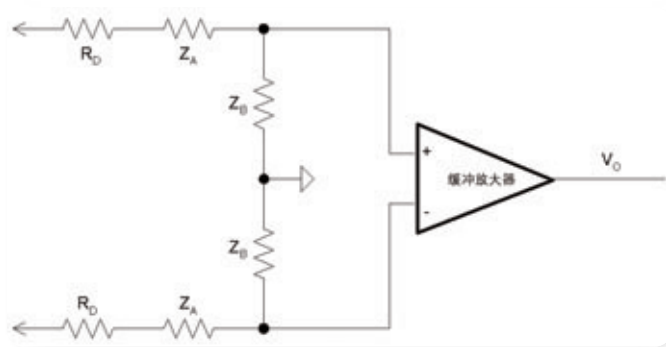
► 应用文章



► 图 3. 三个带焊接 Tip-Clip™ 部件探测电路板的 P7380 差分探头。

尽管简化模型中没有显示，探头电缆传输线还包括一套附加线，以向探头缓冲放大器提供电源和其他可能的控制信号，如偏置电压。（有关探头模型的其他信息，请参阅 www.tek.com 上的技术简介“TekConnect Probes: Signal Fidelity and Modeling”。）

差分有源探头也包含一个缓冲放大器，但与单端有源探头不同，它的输入衰减器和放大器输入级上有一个平衡差分结构。差分探头缓冲放大器实质上是对输入信号执行从差分到单端的转化。对使用差分信号的高速串行数据信号，通过这种探头转换可以在单个示波器垂直通道中测量一对差分信号。事实上，差分探头就像一个理想的差分信号接



► 图 4. 差分有源探头的简化型号。

收机，能显示差分接收机输入所能看见的信号。图 3 所示为 Tektronix P7380 型号，该款为 8 GHz 差分探头，带有用于连接探头与差分数据信号对的焊接 Tip-Clip™ 部件。P7380 探头可带有多种 Tip-Clip 适配器，可用于焊接、可变间距手持式或固定应用。

图 4 所示为差分有源探头的简化模型。差分探头平衡差分输入结构的匹配对其差分测量性能至关重要，尤其是在高频时寄生元件会严重影响响应。由于差分探头的一个重要测量优势在于其对共模噪声的抑制，尤其是在高频，因此要得到高 CMRR 性能，在差分探头中对输入信号路径和缓冲放大器输入级的匹配是一个至关重要的设计任务。虽然单端探头和差分探头模型都有一个类似放大器模样的符号，但差分探头缓冲放大器针对高 CMRR 进行了优化。

比较图 2 和图 4 中的单端和差分探头模型，可以看到单端探头是一个完全不对称的结构。单端探头信号输入的输入阻抗在直流中通常非常高，并且由于探头输入衰减器中的电容元件，输入阻抗会随着频率的降低而降低。另一方面，单端探头接地的输入阻抗在直流中非常低（曾经使用探头地线使电路板电源短路的人员一定会同意本观点），但由于探头地线的感应性，在高频时输入阻抗会显著增加。相比而言，差分探头输入的输入阻抗非常对称，每个输入都像上述的单端探头输入。通常无需将差分探头单独接地。差分探头不接地在进行高保真测量时所具有的优势随后将进行介绍。

无论是单端还是差分探头都需要一个两针的接点与待测电路互联。探头接点需要具有可变间距能力，以便灵活连接到未定义连接间距的不同电路。尽管连接间距的灵活性是一个有用的功能，但全带宽性能通常会将目前的高性能探头的可变间距限制在几百密耳之内。虽然可以获得更宽的连接间距，但通常是以降低探头性能为代价的。单端探头上的信号输入接点通常是一个短而固定的引脚，以优化探头负载和测量性能。单端探头上探头接点的可变间距通常由长度灵活可变的接地线来实现。对于要求平衡信号输入的差分探头，可变间距接点的实现取决于互联类型。在焊接互联时，只需调整探头输入阻尼电阻器导线或探头

Tip-Clip 输入线导线即可改变连接间距。在手持式或固定互联时，通常可使用一个带输入引脚的特殊可变间距适配器，其引脚间距可通过手动在有限范围内进行调整。

探头测量的信号保真度也受探头与待测电路连接质量的影响。在焊接互连时，探头连接质量通常很高，除非焊接技术差导致虚焊。在手持式或固定互联时，很重要的一点是两个探头连接引脚都要与电路节点之间有牢固的连接。只连接两个输入引脚之一可能出现如下情况：输入的是有效信号，但测量保真度实际上已经受损，通常是严重受损。最佳探头互联设计可提供探头输入引脚的机械柔顺性，以平衡两个输入引脚之间的作用力，使两个引脚都能与电路接线可靠连接。如果是单端探头，通常通过使用弹性加载或弹性地线连接提供机械柔顺性。如果是差分探头，在一些新式探头设计中，通过手持式或固定适配器中使用橡胶垫获得机械柔顺性。

单端示波器探头的探头端部设计有一个接地点，用于连接到待测电路的接地参考点。单端探头测得的电压是信号连接点与该接地参考连接点之间的电压差。正如前面所提到的，这是固有的非对称测量配置，对测量保真度会造成一些困难。由于接地参考连接点是很多潜在测量问题的来源，因此了解电子电路应用中所使用的接地的本质很重要。

信号和探头接地

有史以来，“接地”一词正如其字面意思所述，是与大地土壤的导电连接。研究首个重要电子通信系统—电报的开发人员发现，通常地面能够导电，其导电性能使其足可用作二进制电报信号的回流路径。尽管已经证明，接地回流路径对随后出现的电话系统中的模拟语音通信而言，噪声太大，但直接接地仍应用于目前的配电系统中。配电时，接地被用作安全连接，通过分流电气故障电流保护操作人员和设备免受过量电压电平的伤害。

在电子设备中，接地的概念已经与所有内部信号的公共参考电压混为一谈。该内部信号接地通常也通过一个低阻抗路径连接到设备机箱和电源系统安全接地。理想的信号接地是完全的零电压参考，可用于接入信号回流或作为源信号回流而不改变电压电平。尽管零阻抗、零感抗接地基准在原理图中经常会出现，但在现实中并不存在。理想接地是概念上的简化，具有很大局限性，对于当今的高速电路设计尤其如此。如果不能充分理解来自非理想接地阻抗尤其是电感元件的影响，会产生严重的电路设计问题，同时还容易造成信号测量误差。

尽管在绝大多数电路图中接地点仅显示为一个通用示意符号，但在电子电路设计中接地结构的实际物理布局对于电路内的噪声控制和电路外的噪声抑制却是相当重要。尤其

是当今高速电路的设计中，很多信号连接必须按照传输线对待，因为信号间的串扰已经成为一个严重的设计限制因素。在高速设计中最常用的接地结构是全电路板接地平面，这种接地结构能够提供低阻抗，同时可能更重要的是，能够提供一个低电感接地参考连接。

尽管在大多数示意图中没有明确显示，但信号接地的另一个重要功能是向信号回流提供路径。在高速设计中使用接地平面的主要原因之一是提供可控的信号回流路径，而这有助于隔离信号。通常使用一个内部分层接地平面为电路板表面的信号走线建立一个微带传输线结构。由于信号走线和其接地平面之间的互感高，因此信号回流主要在紧邻信号走线下的低电感通道中传输。由于电源平面层可以提供相同的低阻抗回流路径作为接地平面，因此该微带传输线中平面层的物理拓扑是建立此紧密耦合的回流路径的一个关键因素。在这种情况下，电源层即作为交流接地结构，通常还需要一组布局良好的旁路电容器，以便必要时在电源层和接地平面层之间传导回流。

通过使用具有全接地和电源平面的多层电路板和布局良好的旁路电容器，也可以满足高速设计中低阻抗电源的需要。如果没有低阻抗电源，由于流过接地平面层的开关电流的影响，在接地平面会存在明显的接地差。

使用分布于整个电路板的旁路电容器可以将开关电流的影响限于局部，并有助于减小瞬时电压。电源分布系统中的非零阻抗不仅会导致电源和接地平面之间的位差，还会产生与机箱接地相关的共模噪声电压，这可能导致与接地平面相连的导线或者电缆产生辐射噪声。使用接地平面层不仅有助于控制信号回流的路径，还能抑制由于电磁场耦合效应而产生的噪声的注入。由于多数高速信号的阻抗水平相对较低，高速设计中的噪声耦合效应主要是感性的而非容性的。信号环路中由于高速信号电流变化而产生的磁场会通过互感耦合影响附近其他的信号环路。当今高性能电路设计中的信号的高密度有加剧信号间这种串扰的趋势。由于电感耦合的程度取决于裸露环面积，所以使用紧邻信号走线的接地平面可减少环面积，从而减少噪声耦合。

示波器探头电压测量始终在两个电路节点之间进行。单端电压探头有一个信号输入和一个接地连接，其中一个电路节点始终为地。因为探头中的内部接地点，可通过仅将探头信号输入连接到待测电路即可进行单端探头测量。事实上，如果只连接探头的信号输入，会显示一个信号波形，尤其是对于低输入电容有源探头。不幸的是，只连接信号输入的探头形成的接地环面积很大，包括探头地线返回示波器的路径、通过示波器机箱到示波器电源安全接地点的路径、通过交流配电系统到测量电路电源的路径以及到局部电路接地点的路径。巨大的环路面积暴露探头测量，大量噪声有潜在注入到被测信号的危险。由于潜在的噪声注

入，这种只连接信号输入的探头连接对探头位置和移动高度敏感。还有一种可能，信号的高频分量将通过探头端部接地屏蔽物和电路接地点之间的寄生电容耦合找到局部回流路径。不连接低阻抗探头地线，只连接信号输入的探头连接也会受在探头电缆的长护套和接地路径中探头端部电容和相对较大的寄生电感产生的探头输入谐振的影响。

即使探头地线连接到待测电路，仍然有一些需要考虑的测量保真度问题：

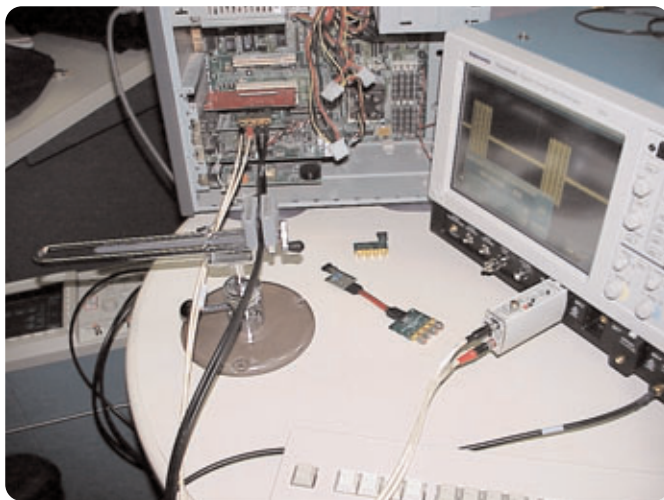
- 测量电流信号可能由于探头信号输入连接负载而受轻微干扰。
- 由于探头地线中的共模电流和对测量电路与连接的示波器之间的地电位差的屏蔽，探头接地点可能将一些噪声导入被测探头信号。
- 探头测量接地环可能会拾来自测量点附近其他信号环路的耦合电感噪声。
- 使用探头地线连接到局部电路接地点，探头输入谐振电路仍然存在，但谐振频率比只连接信号输入点的探头连接更高，这是由于短探头地线的探头接地路径阻抗较低所致。从理论上说，该探头输入谐振频率高于探头带宽，而在该带宽范围内，其对测量保真度的影响最小。

几乎所有以上的探头问题都可以通过使探头地线尽可能短得到大大缓解。理想的探头接地应该是同轴连接，但这对于常规使用通常不实用。

使用差分探头进行单端测量

► 应用文章

考虑到以上列出的潜在问题，可能有人会怀疑是否能在高速电路上以良好的保真度进行单端探头测量。例如，如何使用两个单端探头测量和比较一个电路板上两个完全独立的信号？因为两个完全独立的信号之间的接地通常也是完全不同的，要得到最佳信号保真度，应将两个探头的接地线置于何处？答案是以尽可能短的地线长度将每个探头的地线置于各个电路节点附近的接地节点。这样，即使两个探头地线之间存在显著的位差，每个探头都可以使用局部信号接地参考。这种可能性的存在主要由于探头端部和探头电缆部件的噪声抑制行为。探头电缆部件是同轴电缆，可以屏蔽电容耦合噪声信号，更重要的是可以抑制音频范围之外的（无论是传导耦合还是电感耦合）共模信号。在同轴电缆中，信号通过中心导体传播，而信号回流通过电缆护套的内表面传播回来。由于中心导体和护套内表面之间的紧密耦合，同轴电缆可起共模变压器的作用（请参阅 Henry Ott 的文章“*Noise Reduction Techniques in Electronic Equipment*”^{*1}）。共模变压器是直流耦合的，传导正常模式的信号不会衰减，但会抑制护套截止频率之上的共模信号，对多数同轴电缆，该频率在音频带宽范围内。探头端部结构也被屏蔽，且是探头电缆同轴路径的有效扩展。探头的这种共模信号过滤行为使探头即使在相对嘈杂的环境中也能以良好的信号保真度进行测量。该共模



► 图 5. 用于兼容性测试的 P7380SMA SMA 输入探头。

噪声过滤的薄弱环节是探头地线。由于探头地线不是探头同轴结构的扩展，所以探头地线中传导的共模噪声电流不会被共模变压器的活动抑制，而会耦合进测量信号中成为噪声。因此，探头地线长度应该保持尽可能短以最小化地线感应噪声耦合。

通常差分有源探头都有平衡的高阻抗信号输入，没有可接的接地触点。一些差分探头可能有接地插座用于电池供电的测量应用，这时需要一个接地基准，但一般而言，高性能的差分探头没有可接的接地点。差分探头输入衰减器是其主示波器的接地参考，但通常无需将内部探头接地连接

^{*1} Ott, Henry W., *Noise Reduction Techniques in Electronic Systems*, 2nd ed, Wiley, 1988

到测量电路接地端，实际上这样的连接可能引入使用单端探头时出现的一些接地问题。与单端探头相比，差分有源探头上缺少接地点以及平衡的信号输入具有以下优点：

- 不会由于探头接地的导入而产生测量电路接地参考微扰
- 不会由于探头接地环的导入而向测量信号路径中引入噪声信号
- 降低了由于平衡探头输入结构和探头的高 CMRR 而引起的共模噪声信号
- 不会有由于疏忽连接到探头接地点而导致电路信号或电源短路

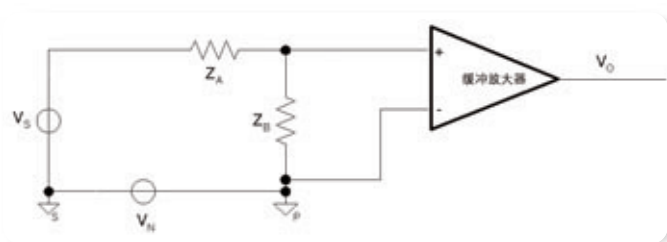
最近引进的一种新式差分有源探头是 SMA 输入探头。图 5 所示的为 Tektronix P7380SMA 型号，该型号是 8 GHz SMA 输入探头，使用 SMA 连接器接口连接到高速串行数据信号分线板。SMA 输入探头设计用于高速串行数据信号路径的兼容性测试（探头的两端都在该路径中）和信号测量。（有关串行数据兼容性测试的其他信息，请参阅 www.tek.com 上的操作说明书“The Basics of Serial Data Compliance and Validation Measurements”。）SMA 输入探头上的两个输入端都有 50 欧姆的输入阻抗（而非高输入阻抗），以便为绝大多数新串行数据标准信

号提供干净的信号终端。P7380SMA 探头还有一个连接到其输入终端电阻器的可调终端电压，以便减少信号直流偏载问题而无需交流耦合。将差分信号连接到测量电路是通过使用损耗补偿、延迟匹配的电缆部件而实现的。当然，这种电缆部件通过 SMA 连接器接地引入了对测量电路的接地。但是，同轴探头连接不会出现与前面所述典型单端探头接地相同的接地噪声耦合问题，这是因为 SMA 连接器接地的完全屏蔽同轴性质。

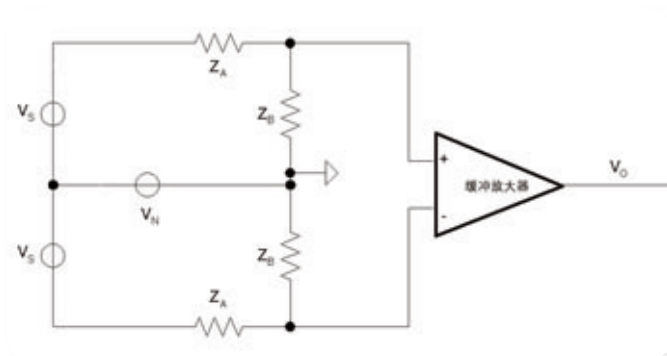
尽管差分探头是进行差分测量的理想工具，但是也可以使用其他测量方法。例如，可以使用两个单端探头进行差分测量，方法是利用在大多数高性能示波器上可用的波形数学运算功能从而计算差分信号。但是，与差分探头测量相比，这种伪差分测量存在信号保真度问题。这些问题来自单端探头接地以及降低的 CMRR（该降低的 CMRR 是由于两个独立探头之间和两个独立示波器信道之间的高频匹配困难而引起的）。由于测量信号延迟在探头或示波器信道不是完全匹配，所以伪差分测量方法也需要在进行精确的伪差分测量之前进行相差校正操作。相比之下，差分探头在进行单端测量时没有真正的缺陷。正如以下部分所示，差分探头是进行单端测量的优秀测量工具。

使用差分探头进行单端测量

► 应用文章



► 图 6. 单端有源探头的简化模型。



► 图 7. 差分有源探头的简化模型。

使用差分探头进行单端测量

通过将差分探头的负极性输入用作接地参考点，可以将其实用于单端测量。尽管差分探头可以用作单端探头，但有关差分探头如何高效进行单端测量的问题，还值得详细探讨。有关单端探头和差分探头接地之间的比较对使用差分探头进行单端测量所具有的一些噪声性能优势已进行了说明。现在，将在使用差分探头时应该考虑的其他几个有关单端测量性能的问题的讨论中，给出关于差分探头的噪声抑制性能优点的更多定量分析。

有关差分探头的单端测量性能的第一个问题是探头响应的精确度。一个设计良好的差分探头应在其单端响应和其差分响应之间的匹配上显示出卓越性能。设计良好的差分探头的两个输入极的增益和频率响应必须紧密匹配，以保证良好的差分响应。由于可更轻松地进行单端频率响应验证测量，所以差分探头性能常可通过对输入信号两极进行单端性能测量来验证。使用完全匹配的探头输入设计，对单端信号响应的验证可以确保精确的差分信号性能。

使用差分探头进行单端测量所具有的几个优点，已在前面有关探头接地的部分详细介绍过。现在，将展示一个简化但更定量的，差分探头输入结构对接地噪声进行抑制的分析。图 6 所示为一个单端有源探头输入的简化模型。该模型忽略了一些细节，诸如信号源阻抗和探头输入阻尼阻抗的影响，以便该分析能够集中于探头和电路接地之间噪声电压产生的影响。还假设缓冲放大器具有单位电压增益。

因为探头和电路接地点之间的噪声电压实际上与电路信号源电压串联，则缓冲放大器的输出电压为

$$V_O = (V_S + V_N) * [(Z_B / (Z_A + Z_B))]$$

$$V_O = V_S * [(Z_B / (Z_A + Z_B))] + V_N * [(Z_B / (Z_A + Z_B))]$$

该探头缓冲放大器输出电压表达式中的第二项表示接地噪声项，它与该简单模型中的信号源电压有相同的有效增益。可以看出，从探头输出的被测信号中探头缓冲放大器接地点和测量电路接地点之间的噪声电压将被捡拾进来。

作为比较，图 7 所示是一个差分有源探头的简化模型。该差分模型与之前的单端探头模型进行了相似的简化，只包括平衡源驱动和平衡探头输入结构。在该简化模型中，源共模电压假定为零伏。

因为探头和电路接地点之间的噪声电压实际上与两个探头输入路径串联，其影响在探头输出时被探头输入结构的差分为消除了，如下所示。

$$V_P = (V_{DP} + V_N) * [(Z_{BP} / (Z_{AP} + Z_{BP}))]$$

$$V_N = (V_{DN} + V_N) * [(Z_{BN} / (Z_{AN} + Z_{BN}))]$$

由具有共模电压的差分缓冲放大器中得到的差模输出电压是

$$V_O = V_P - V_N = [(V_{DP} + V_N) - (V_{DN} + V_N)] * [(Z_B / (Z_A + Z_B))]$$

该电压抵消接地噪声项后，变为以下表达式

$$V_O = (V_{DP} - V_{DN}) * [(Z_B / (Z_A + Z_B))]$$

该简化分析中接地噪声项之所以被完全抵消，是因为这些理想匹配的探头输入衰减器的 CMRR 为无穷大。在实际的探头输入结构中可能会存在一些不匹配的探头输入衰减器，而且由于寄生元件（简单模型中未显示）的影响，这种不匹配一般会随着频率的增加变得更加严重。如果在 DC 时差分探头输入的衰减器之间有 0.1% 的阻抗不匹配，将导致大约 60 dB 的 CMRR。在频率为 1GHz 时，探头输入衰减器和探头缓冲放大器中的寄生效应会使一个设计良好的差分探头的探头 CMRR 降低到大约 40 dB，这表示大约 1% 的信号路径不匹配。在全探头带宽中，预计探头 CMRR 将会降低到另一个数量级，大约为 20 dB 或更少。

由于接地噪声抵消的程度取决于差分探头测量结构的 CMRR，因此值得注意的是信号源阻抗不匹配会降低 CMRR，从而降低接地噪声的抵消程度。对于单端信号测量影响尤其明显，因为在单端测量中由于信号接地连接而存在不对称信号源阻抗。对于高速信号，为支持传输线信号环境，通常都有一个低信号源阻抗，因而进行单端测量时在 DC 情况下信号源阻抗不匹配的影响较小。对于单端信号测量，50 欧姆的信号源阻抗不匹配对于探头输入阻抗为 50 K 欧姆的探头的 DC CMRR，只有微小的影响。但是，当信号频率增加时，探头输入阻抗开始减小，最后，这种 50 欧姆的信号源不匹配对单端测量的影响可能变得极为严重。在差分测量时，高频 AC 共模瞬态电压在很大程度上会被相对较高的 CMRR 抑制，但在单端测量时，由于 CMRR 降低，则会产生显著的影响。

有源探头缓冲放大器通过将探头端部的测量信号传输到探头电缆末端的示波器通道输入端，在信号输入时精确重现信号的存在。精确的信号重现要求探头缓冲放大器必须为线性并且要有一个得到良好控制的脉冲响应。良好的脉冲响应得自于探头的以下设计理念：在其频率范围内相对连续的增益，在其带宽限制内平滑并且平缓的增益滚降，以及对于已知的寄生效应（如探头电缆损耗）的补偿。但是，探头缓冲放大器只在有限范围内呈现线性响应。有源探头缓冲放大器的线性工作范围受限于主示波器提供的探头电源和放大器体系结构。

使用差分探头进行单端测量

► 应用文章

通常，指定几个不同的电压范围来定义有源探头的输入电压范围限制。所指定的最大电压范围通常是指非破坏性输入电压范围，该范围表示可以应用于探头端部而不会对探头造成物理损害的最大绝对电压。非破坏性输入电压范围通常是指热量损害限制或击穿电压限制，包括可允许的电压应用时间限制。尽管没有着重指出，但持续时间短的高压事件，如静电放电脉冲，也会对探头输入造成永久损害。这种情况对于一般在实际上输入分量小的高频探头输入，尤其明显。使用高性能有源探头时，戴上连接到主示波器机箱接地终端的防静电护腕带始终是一个好习惯。

所指定的可用探头工作的最大电压范围是输入共模电压范围或工作电压窗口。输入共模电压范围表示在其中扫描更有限的探头线性动态范围的允许电压窗口，带有单端测量的电压偏置，或根据探头 CMRR 进行自动调节的差分测量。由于有源差分探头自动抑制共模输入电压，必须通过进行单端电压测量来验证其是否违反共模电压限制。如果尝试测量超出工作电压限制的信号，通常会导致非线性响应压缩，最终导致信号限制。

为有源探头指定的实际线性工作电压范围称为探头动态范围。由于高速、线性响应的要求，有源探头动态范围通常是探头电源范围的一小部分，并且受探头体系结构设计和探头输入衰减器衰减系数的极大影响。实际上，探头输入衰减器一般用于将有源探头的有效动态范围扩展到超出探头放大器自身的固有动态范围限制。一些探头还包括一个可选的衰减系数，以在探头动态范围和噪声电平之间达到一个平衡。

高性能探头放大器的线性工作范围受设计所限，以便在满足信号上升时间和带宽要求的同时仍然保持在合理的探头放大器功率损耗限制之内。由于内部探头放大器电路节点电压必须以极快的速度充放电，所以限制电压摆动有助于改善高频性能，但降低了线性工作范围。同样，限制可用于充放电内部探头放大器电路节点的电流也对功率损耗有帮助，但也降低了探头频率响应。由于许多需要满足总体探头性能要求的设计折衷，探头动态范围常常到最后只是满足大部分但非全部应用要求的折衷。高性能探头一般设计用于高性能应用而非普通应用。

对于使用较大 DC 电压分量的单端测量，可以使用探头电压偏置控制扩展有效探头动态范围。许多高速串行数据信号都有一个 DC 偏移以允许单个电源工作，但通常还有一个针对高速开关功能的小得多的数字信号摆动。例如，一个用于计算机和视频显示监视器之间的高速 I/O 的 DVI/HDMI 差分信号，使用互补 CML 逻辑驱动器驱动 50 欧姆的传输线。CML 逻辑驱动器使用相对于 CML 接收机 V_{cc} 电源的 50 欧姆电阻器为终端。如果 V_{cc} 为 +3.3V，典型的单端 CML 信号可能会在 +3.3V 和 +2.7V 之间摆动。对于 DC 平衡的信号，这样会导致 +3.0V 共模电压和 600mVpp 开关信号。对于类似衰减设置为 5X 和 25X 的 P7380 探头，两种衰减设置都有足够动态范围来测量 600mVpp 信号，但一般情况下，由于其较低的噪音电平而会首选 5X 衰减设置。进行此单端测量时，两种衰减器设置都需要使用偏置电压控制来抵消 +3.0V DC 偏移，将数字信号摆动移动到探头动态范围窗口内。

使用差分探头测量差分信号不对称

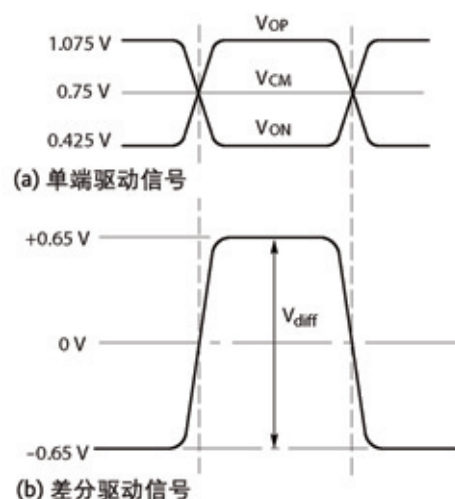
差分信号是由两个互补驱动的接地参考信号组成的。理想情况下，这两个互补信号是匹配的，但信号极性相反。要使用单个电源电压生成差分信号，通常一对差分信号是由共模偏移提供信号源的。该偏移电压在差分接收机的工作电压范围内改变互补信号摆动的程度。由于其高 DC CMRR，差分接收机或测量探头可以有效去除这种传输共模偏移。图 8 所示是差分接收机或探头显示的具有共模偏移的传输差分信号对以及得到的差模信号的示例。（有关差分信号的更多信息，请参阅 www.tek.com 上的入门文章“High - Speed Differential Signaling and Measurements”。）

要充分描述差分信号的特征，需要测量三个独立的探头布局：

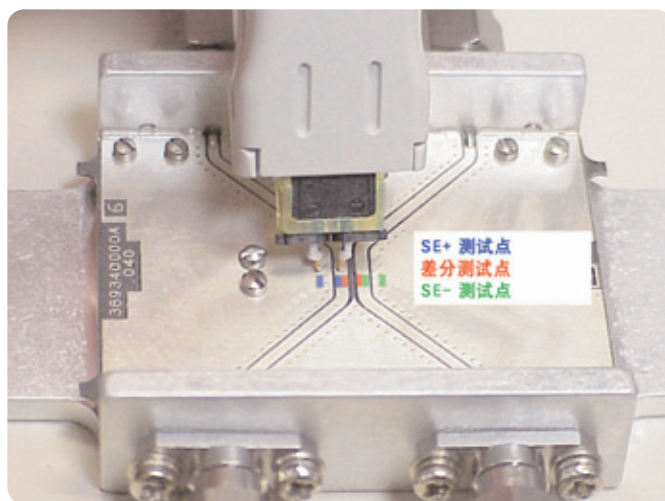
- 在两个互补信号之间的差分测量 (DIFF)
- 在正极信号和接地之间的单端测量 (SE+)
- 在负极信号和接地之间的单端测量 (SE-)

随后的例子中将依次进行这三种测量，测量波形以常见触发显示存储在示波器中以显示幅度和定时的关系。

图 9 所示为随后例子中差分探头测试夹具上使用的探头引脚连接的位置。该探头测试夹具板具有差分共面波导传输线。尽管可以通过焊接三个独立的 Tip-Clip 进行这三种测量，未连接的 Tip-Clip 的负载效应会轻微影响信号测量，尤其是影响高速信号。通过使用可变间距 Tip-Clip，在三个测量位置间依次改变 Tip-Clip 引脚来探测差分探头测试适配器走线位置，可以获得最佳测量保真度。



► 图 8. 形成差分信号的互补单端信号。



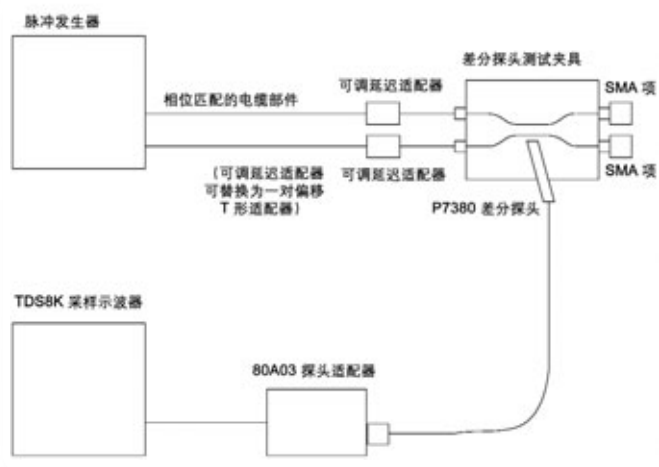
► 图 9. 照片显示探头测试夹具的 DIFF、SE+ 和 SE- 探测点。

使用差分探头进行单端测量

► 应用文章

测量差分信号的单端响应的主要原因是鉴别可能造成差分信号质量问题的信号违规或信号非对称情况。描述高速串行数据信号质量特征的惯用工具是眼图显示。眼图显示是在一个时钟窗口期间每个信号跃变覆盖在彼此之上形成的累积波形。眼图显示可用于检查与允许的信号模板（有时也称为眼图模板）相关的幅度和定时问题。如果差分测量眼图显示了幅度或定时不规则，则可以进行单端测量以识别问题源是哪一极或两极都有问题。在稍后的一个使用信号源提供的时钟触发的例子中用到了眼图显示。

尽管串行数据信号的违规情况通常可以通过细致的单端信号测量加以识别，但假定匹配的差分信号对之间的不对称常常难以辨别。形成差分信号的信号对之间的不对称实际上可以将一些差分信号能量转换为共模能量，同样也会将一些通常不被认为是差分信号一部分的共模能量转换为差模噪声。这些混模转换因子和它们实际参与形成差分信号的程度不易量化，尤其是因为信号的共模分量受抑制的程度取决于接收机 CMRR，而 CMRR 随频率的变化非常剧烈。差分探头响应设计用于对高质量差分接收机建模，但可能并不是电路接收机输入的实际表现。通常，将差分对中的单端信号设计的尽可能对称以便最小化这些非对称问题是最好的办法。



► 图 10. 非对称例子的常规设备设置。

在本文的其余部分，将提供几个差分信号对非对称的例子，以此来显示不同类型不对称对差分信号响应产生的影响。尽管所示的非对称例子可能比在一个设计良好的串行数据布局和通信信道中预计的更加极端，但希望能对揭示单端测量在调试差分信号问题中的重要性有所帮助。我们也希望能够以此来说明差分探头对进行差分 and 单端测量都是一个卓越的工具。

这些非对称信号示例的设备设置包括以下信号源和常见测量工具：

- Advantest 的 D3186 脉冲发生器作为带有幅度和定时控制的差分信号发生器
- 一对 SMA 可调延迟适配器 (Tektronix 015-0708-00 型)
- 一对偏移 T 形适配器 (PSPL 5545-107 型)
- 低损耗、相位匹配的电缆部件 (Tektronix 174-4944-00 型)
- 差分探头测试夹具
- 带有可变间距 Tip-Clip 和手持式适配器的 P7380 8 GHz 差分有源探头

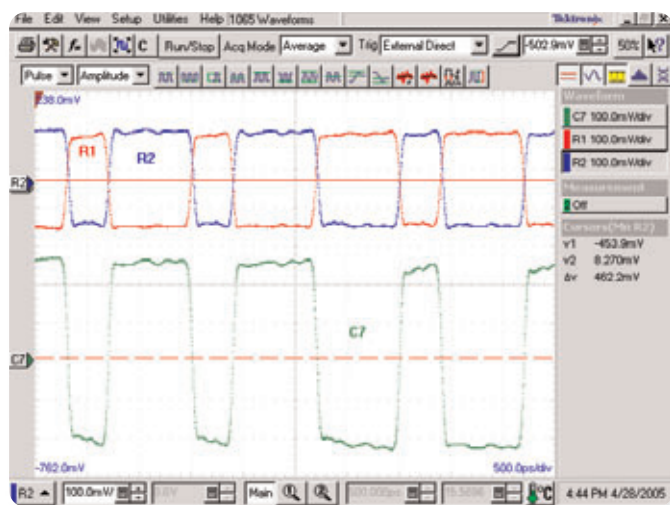
- TDS8200 采样示波器，带有 80A03 TekConnect 探头适配器和 12 GHz 80E02 采样模块

总的设备配置如图 10 所示。

作为对随后所示非对称示例的参考，我们做了一次没有明显不对称的测量。图 11 所示的波形是随后示例中波形的代表，没有注入特定的不对称：

- 波形 R1（红色）是负极单端信号 (SE-)
- 波形 R2（蓝色）是正极单端信号 (SE+)
- 波形 C7（绿色）是差分信号 (DIFF)

从图 11 的波形中显而易见，两个单端信号有互补驱动，并在幅度和时间上匹配的很好。而图 11 中得到的差分波形显示出少许失真，正如所预计的在非常接近单端信号峰 - 峰值两倍的地方有一个幅度。



► 图 11. 示波器屏幕捕获未引入非对称的波形。

形成差分对的信号对之间的幅度和定时不对称都会造成差分信号的质量问题。差分信号对中可能出现的非对称类型包括以下各项：

幅度：

- 峰 - 峰电压
- 共模电压偏移
- 反射
- 串扰
- 噪声

定时：

- 上升时间
- 时滞
- 抖动

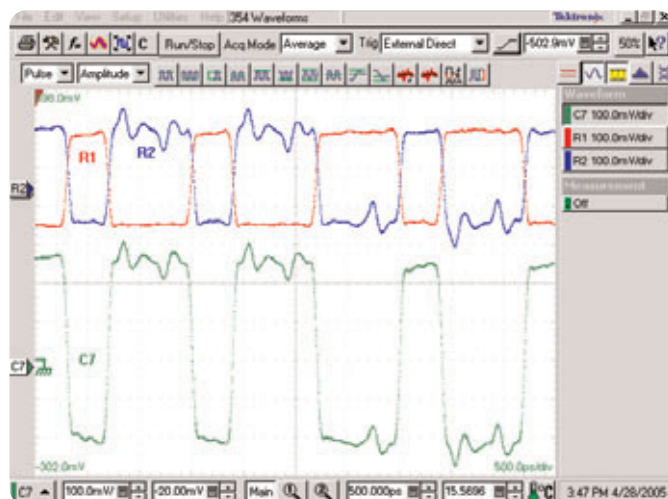
使用差分探头进行单端测量

► 应用文章

图 12 中的第一个例子显示的是差分信号对之间存在于其中一个信号路径中的反射引起的非对称影响。由于信号反射引起的非对称通常会由差分信号对路由中的布局差异导致。即使是非常小心地将差分信号走线的路由路径和终端匹配，还是经常会出现差异，尤其是在高密度 IC 引脚位置或连接器接口处。甚至信号回流路径不同也会导致反射问题，如由于接地平面在过孔集中的区域不连续。以下例子中，将信号路径之一直接端接于探头测试适配器的末端，而另一个信号路径通过 SMA T 形适配器仿真反射不对称。SMA T 形适配器在 50 ps 信号上升时间引入了导致显著反射的非端接残桩不连续。

图 12 中的反射非对称例子显示 R2 (SE+) 波形有一个非常显著的反射而 R1 (SE-) 波形几乎没有。这两个单端波形之间的差异导致直接在 C7 (DIFF) 波形中出现反射。如果只进行差分测量，则显然存在这样的问题，无法得知两个单端信号中的哪一个会有反射问题或者是否两者都有问题。那么，进行单端测量可以帮助识别反射问题发生源。

一旦在使用差分探头的差分信号上观察到反射问题，单端探头可用于测量单端信号响应，通常更方便而且可能更精确的是使用同一差分探头进行这些单端测量。使用差分探头测量单端信号响应避免了之前提及的单端探头接地问题。使用同一探头测量差分 and 单端信号响应也可以避免

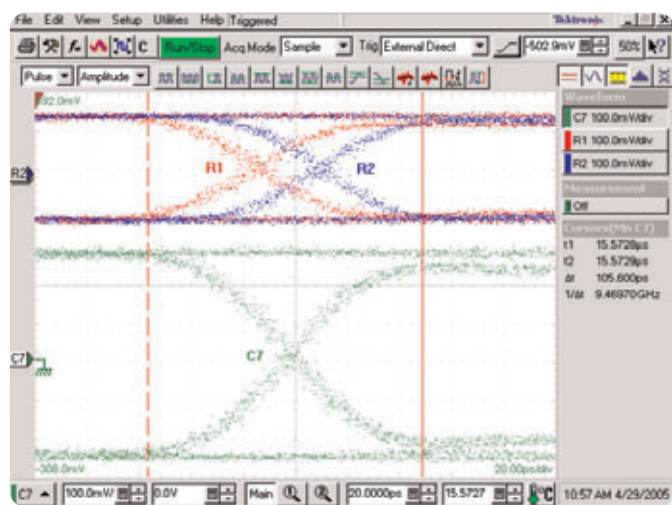


► 图 12. 示波器屏幕捕获具有反射非对称的波形。

在使用两个不同探头进行测量时不可避免的探头负载和探头频率响应存在差异的问题。尽管由于差分 and 单端测量之间的信号源阻抗不同，探头响应将出现一些差异，但在使用一个探头进行两个测量时总差异还是最小化了。对差分信号进行单端测量时，最困难的问题是在期望的信号测量点附近寻找一个好的接地参考点。常用的好办法是在期望的测量点，围绕重要的差分信号添加额外的接地过孔。如果最接近待测信号的接地点离信号太远，单端测量性能可能大大降低。

第二个关于差分信号对之间信号不对称的例子，显示了信号路径时滞的影响。信号时滞通常是由于差分发射机和接收机之间的差分信号对连接路径中的信号走线的路由长度不匹配造成的。当差分信号对走线没有通过公共传输介质一起路由时，也会出现时滞；例如一根在电路板外层上的走线的路由作为微带线，而在内层上的另一根走线作为带状线。信号传播速度在不同传输介质中不同，因此走线长度匹配不等于传输延迟匹配。在该传输延迟不对称示例中，有目的地在一对 SMA 可调延迟适配器中引入时滞。这些可调延迟适配器使用滑动同轴连接对适配器的 SMA 连接器之间的信号延迟进行机械调节。如图 13 所示，单端 R1 和 R2 信号间的延迟差异大约为 20 ps。尽管 20 ps 似乎不是很大的时滞，大约是 60 ps 信号上升时间的三分之一，但肯定对得到的差分信号延迟有影响。

图 13 所示波形显示的是聚焦于信号跳变沿的 2.5 Gbps 信号眼图的时间扩展视图。眼图得自于受稳定的和同步数据速率时钟触发的串行数据码流（本例中为 PRBS-7 信号码型）的信号跳变沿的累积。图 13 所示眼图中，累积信号点的扩展表明信号存在抖动。该信号跳变沿点的眼图清楚地



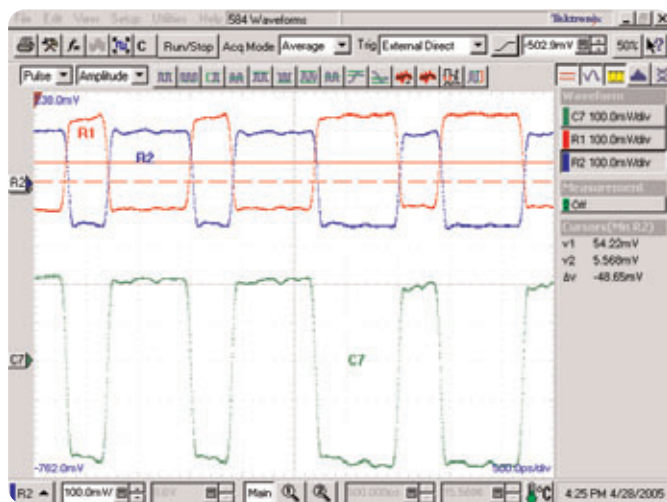
► 图 13. 示波器屏幕捕获时滞不对称的波形。

显示出信号上升和下降时间，在本例中这两个时间非常一致。尽管图 13 中显示差分信号上升时间控制得很好，没有迹象表明存在象征差分对不匹配问题的失真响应，但是单端测量明显显示出定时不匹配问题。只有在极端的时滞情况下，当时滞超出单端信号上升时间时，差分响应上升时间才会显示出明显的异常表现，如在响应上升时间中间的基准脉冲。

使用差分探头进行单端测量

► 应用文章

仔细观察图 13 还可以看出，两个单端信号之间的时滞导致差分信号的上升时间增大。两个单端信号 R1 和 R2 之间的时滞引起信号跳变沿扩展到的时间周期，要比没有时滞出现的差分信号响应中的时间周期长。由于图 13 中 R1 波形 (SE-) 比 R2 波形 (SE+) 信号跳变提前 20 ps 开始其信号跳变，结果 C7 波形 (DIFF) 响应在 R1 跳变的开始处开始其信号跳变。但是，如果没有时滞，起始不同的响应跳变大约出现在跳变比的二分之一处，此时 R1 和 R2 波形以互补方式一起跳变。在 R1 开始跳变的 20 ps 时滞之后，R1 和 R2 波形以相反极性跳变，这导致差分信号响应的跳变比相比没有时滞时所预计的有所升高。最后，在 R1 信号跳变周期结束时，R2 信号跳变继续持续 20 ps 的时滞时间，这样也会扩展差分响应的持续时间，而且也是正常跳变比的一半。从图 13 中可以看出，差分响应跳变的中心出现在两个单端信号之间的时滞周期的中心。因此，两个单端信号之间的时滞导致了差分响应跳变周期的扩展。尽管两个单端信号的上升时间没有被两个信号间的时滞降低，但时滞降低了差分信号上升时间。在这个时滞不对称例子中，两个单端信号之间的 20 ps 时滞造成差分信号上升时间大约增加了 10 ps。



► 图 14. 示波器屏幕捕获偏置电压不对称的波形。

最后一个不对称例子显示了差分对中两个单端信号之间的共模偏移差异产生的影响。这也许不是一个通用应用问题，但也揭示出单端信号电压电平差异对差分响应的影响。图 14 中所示的例子在两个单端信号之间的有一个极端的偏置电压差异，有意将该差异设置的如此大是为了更清楚的揭示影响。在现实世界中，电压偏置或幅度不对称可能是由于驱动器或终端不匹配所致。在这个仿真例子中，通过使用一对 SMA 偏移 T 形适配器和 DC 电源来控制偏置电平，从而进行人工控制单端信号偏置电平。

R1 (SE-) 和 R2 (SE+) 波形的共模电压电平差异由图 14 屏幕捕获图中的直线和点划线水平光标来表示。由于 R1 和 R2 信号有相同的 250mVpp 幅度，两个信号之间 50mV 偏置电压的差异表示 20% 不对称，这是显而易见的。此 DC 偏置电压不对称对 C7 (DIFF) 波形的影响是在差分信号响应中的 DC 电平偏移。如果由该电平偏移了的信号驱动的差分接收机将其判决点设置在零伏上，那么结果接收机输出会显示占空比中的明显偏移，在眼图显示中表现为抖动增加。

结论

传统上，单端探头仅用于单端测量，而差分探头仅用于差分测量。随着高性能差分探头可用性的提高，这种传统样式正在发生改变。使用差分探头进行单端测量，尤其是进行高速信号测量有很多优点。由于全面描述差分信号的质量需要对差分信号对同时进行差分 and 单端测量，因此推荐使用差分探头作为进行这种全套测量的选择。

参考文献：

Ott, Henry W., Noise Reduction Techniques in Electronic Systems, 2nd ed, Wiley, 1988

TekConnect®

出色的信号保真度和无可比拟的多功能性全都唾手可得。



无论您是测量高电压、电流、电源还是微伏级信号，TekConnect 接口都将探头智能提高了一个层次。TekConnect 接口在示波器输入端使用最高为 18 GHz 的有用带通来确保超级信号保真度，同时还提供无与伦比的多功能性。利用 TekConnect 接口，就可以保持最大的信号完整性以满足您目前和未来的带宽需求。

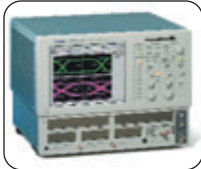
Z-Active™ 差分探头系列 - P7313, P7380

探头体系结构引领高速应用的方向。



无论您是测量高电压、电流、电源还是微伏级信号，TekConnect 接口都将探头智能提高了一个层次。TekConnect 接口在示波器输入端使用最高为 18 GHz 的有用带通来确保超级信号保真度，同时还提供无与伦比的多功能性。利用 TekConnect 接口，就可以保持最大的信号完整性以满足您目前和未来的带宽需求。

CSA/TDS8200



CSA8200 通信信号分析仪和 TDS8200 数字采样示波器构成 Tektronix 的超级性能采样示波器产品线的基础。籍由其业界最优的水平时基稳定性、信号敏感性和噪声性能，该仪器确保得到最精确的采集信号。在最大带宽 70+ GHz 时，CSA/TDS8200 能够以 40 Gbp/s 或更高的速率分析光信号和电信号。一个广泛的内置测量库使其成为对超高速元件、收发器和传输系统进行定性和兼容性测试的理想工具。

与 Tektronix 联系：

- 奥地利 +41 52 675 3777
- 巴尔干半岛、以色列、南非及其它 ISE 国家/地区 +41 52 675 3777
- 巴西和南美 55 (11) 3741-8360
- 比利时 07 81 60166
- 波兰 +41 52 675 3777
- 丹麦 +45 80 88 1401
- 德国 +49 (221) 94 77 400
- 东南亚国家联盟/澳大拉西亚/巴基斯坦 (65) 6356 3900
- 俄罗斯、独联体 7 095 775 1064
- 法国和北非 +33 (0) 1 69 86 81 81
- 芬兰 +41 52 675 3777
- 韩国 82 (2) 528-5299
- 荷兰 090 02 021797
- 加拿大 1 (800) 661-5625
- 卢森堡 +44 (0) 1344 392400
- 美国 1 (800) 426-2200
- 墨西哥、中美洲和加勒比海 52 (55) 56666-333
- 南非 +27 11 254 8360
- 挪威 800 16098
- 欧洲中东地区、乌克兰和波罗地海 +41 52 675 3777
- 葡萄牙 80 08 12370
- 日本 81 (3) 6714-3010
- 瑞典 020 08 80371
- 瑞士 +41 52 675 3777
- 台湾 886 (2) 2722-9622
- 西班牙 (+34) 901 988 054
- 香港 (852) 2585-6688
- 意大利 +39 (02) 25086 1
- 印度 (91) 80-22275577
- 英国和爱尔兰 +44 (0) 1344 392400
- 中东、亚洲和北非 +41 52 675 3777
- 中华人民共和国 86 (10) 6235 1230
- 中欧和希腊 +41 52 675 3777
- 其他地区请联系 Tektronix 公司 1 (503) 627-7111
- 最后更新日期：2005 年 6 月 15 日

了解更多信息

Tektronix 维护一个全面的和不断扩展的应用文章、技术简介和其他资源的集锦，可帮助工程师使用最新的技术。请访问 www.tektronix.com



版权所有 © 2005, Tektronix, Inc. 保留所有权利。Tektronix 产品受美国和外国专利权（包括已取得的和正在申请的专利权）的保护。本文中的信息将取代所有以前出版的资料中的信息。保留更改产品规格和价格的权利。TEKTRONIX 和 TEK 是 Tektronix, Inc. 的注册商标。引用的其他所有商标名称均为他们各自公司的服务标志、商标或注册商标。