UNI-T

以太网一致性分析解决方案

1000BASE-T

1000BASE-T 一致性概述：

在工业 4.0 与智能制造深度渗透的当下，工业以太网作为工业设备、控制系统与云端平台的核心通信枢纽，其通信稳定性、兼容性直接决定生产线运行效率与数字化转型成效。

以太网一致性测试是一套系统性的验证流程，旨在确保待测设备（DUT）的物理层（PHY）和链路层特性完全符合 IEEE 802.3 系列标准的规定。这并非简单的“通断”测试，而是一次对设备电气特性、时序、信号质量、协议规范等维度的且严苛的“体检”。

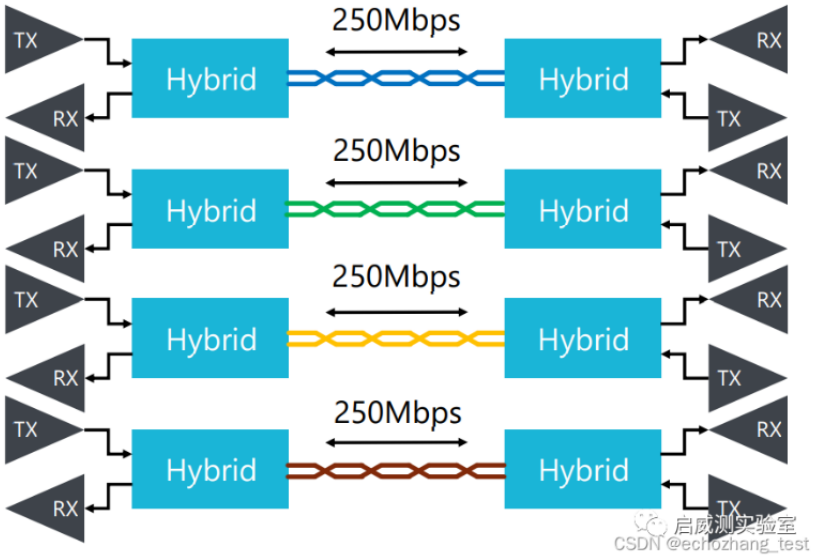
本应用方案主要介绍：

- 认识 1000BASE-T
- 1000BASE-T 一致性测试项目及规范解读
- 1000BASE-T 一致性测试方案
- 1000BASE-T 一致性测试实例展示
- 订购信息

认识 1000BASE-T

以太网是当前使用最广泛的计算机网络。与 100BASE-Tx 不同，1000BASE-T 采用了 UTP（非屏蔽双绞线）所有的四对线，并且同时收发数据，在全双工模式下，使用 4D-PAM5 编码方式实现 1000Mb/s 传输速率。大大提高了以太网的传输速率，比原先 100BASE-Tx 提高了 10 倍的信息吞吐量。

每条 lane 传输数据速率为 100Mb/s，经过 8b/10b 编码为 125Mb/s，使用 4D-PAM5 物理层编码方式，每 2bit 为 1 个 Baud 发送，实现最高传输速率 125Mb/s×2×4=1000Mb/s



注：图片引用自启威实验室

100BASE-Tx 与 1000BASE-T 的对比

相同点：

- 传输媒介相同；都使用 RJ45 接口，都支持 5 类或超 5 类传输线缆。
- 兼容性；1000BASE-T 使用与 100BASE-Tx 和 10BASE-T 相同的协议信令，兼容 100BASE-Tx 和 10BASE-T。

差异点：

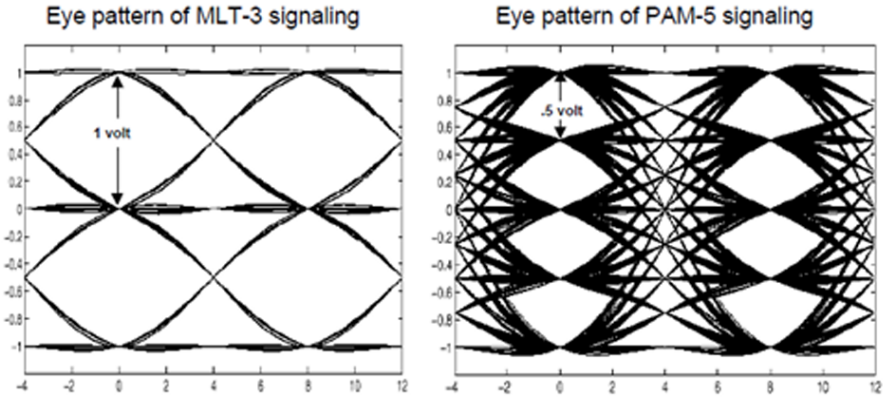
- 100BASE-Tx 仅使用两对双绞线，一对进行发送，一对接收，接收和发送不能同时处理，1000BASE-T 则采用所有的差分对，数据可以同时收发，正因如此，1000BASE-T 的邻道干扰干扰比 100BASE-Tx 更厉害，一致性测试时也需要进行加扰测试。
- 编码方式不同。100BASE-Tx 采用 MLT-3 信号编码，共 3 个电平 1bit 传输，而 1000BASE-T 则使用 4D-PAM5 编码方式，2bit 为 1baud 传输，编码更复杂，一致性测试时需要对每个电平单独进行模版测试，难度加大。
- 抖动测试挑战。测试时钟不在测试夹具上，需要单独引入，一致性测试时需要单独将时钟引入示波器，无法引入时钟时，恢复的时钟抖动测试可以作为参考。
- 快速的上升时间。 1000BASE-Tx 的边沿上升更快 < 3ns，其上升/下降沿过快可能会产生过大的 EMI，且信号电平-2~ + 2 共五个电平，对测试设备动态范围要求较高。
- 1000BASE-T 需要进行独有的加扰测试，对于加扰信号谐波抑制要求较高，需大于 40dB。100BASE-Tx 由于只采用 2 对差分对，且距离较远，不需要进行加扰测试。

管脚	名称	说明
1	Tx+	Tranceive Data+
2	Tx-	Tranceive Data-
3	Rx+	Receive Data+
4	未使用	Not connected
5	未使用	Not connected
6	Rx-	Receive Data-
7	未使用	Not connected
8	未使用	Not connected

管脚	名称	说明
1	Tx_D1+	Tranceive Data1+（发送）
2	Tx_D1-	Tranceive Data1-（发送）
3	Rx_D2+	Receive Data2+（接收）
4	BI_D3+	Bi-directional Data3+（双向传输）
5	BI_D3-	Bi-directional Data3-（双向传输）
6	Rx_D2-	Receive Data2-（接收）
7	BI_D4+	Bi-directional Data4+（双向传输）
8	BI_D4-	Bi-directional Data4-（双向传输）

100BASE-Tx 引脚使用（左）、1000BASE-T 引脚使用（右）

1000BASE-T 的 4 对双绞线使用全双工运行，网络设备需要串扰/回声消除技术，超 5 类及更高的布线系统都可以支持 4 级编码（4D-PAM5）。编码使每个信号电平代表 2 比特原始数据，因此，1000BASE-T 的符号速率为 125Mbps，与 100BASE-TX 符号速率相同。1000BASE-T 编码后的 Baud 符号“+2、+1、0、-1、-2”分别对应实际电平为“-1V、-0.5V、0V、0.5V、1V”。



100BASE-Tx（左）和 1000Base-T（右）眼图

1000BASE-T 测试模式

IEEE802.3ab 规定，进行 1000M 以太网一致性测试时需要设置寄存器令 DUT 进入四种不同的测试模式，以保证一致性测试结果的正确性。对于主流的网络芯片，可通过修改相关寄存器或使用芯片厂商的发包工具控制发出一致性测试波形，**相关的寄存器配置软件需要用户咨询以太网芯片厂家获取**。协会规定了 Test Mode1~Test Mode4 共四种测试模式的码型。

Table 40–7—GMII management register settings for test modes

Bit 1 (9.15)	Bit 2 (9.14)	Bit 3 (9.13)	Mode
0	0	0	Normal operation
0	0	1	Test mode 1—Transmit waveform test
0	1	0	Test mode 2—Transmit jitter test in MASTER mode
0	1	1	Test mode 3—Transmit jitter test in SLAVE mode
1	0	0	Test mode 4—Transmitter distortion test
1	0	1	Reserved, operations not identified.
1	1	0	Reserved, operations not identified.
1	1	1	Reserved, operations not identified.

通过设置物理层芯片中第 9 个 GMII 管理记数器第 15,14,13 位，就能设定物理层芯片的状态。

测试模式 1

测试模式 1 主要用于峰值电压、模版、顶降等电压测试项目。其波形如下图，采用 4D-PAM5 的编码方式进行传输，共五个电平（-2，-1，0，+1，+2）。测试模式 1 信号是由+2，然后接着 127 个 0，-2，然后接着 127 个 0，+1，然后接着 127 个 0，-1，然后接着 127 个 0，接着是 128 个+2，128 个-2，128 个+2，128 个 2，最后是 1024 个 0。验证目的是：接口能否驱动足够的能量将信号传送 100 米距离，上升时间是否足够快以实现快速的数据交换，接口有否发射过多的 EMI，超过 FCC Class A 的要求，信号是否对称，即 A 与 B，C 与 D 是否对称等。其信号制式如下：

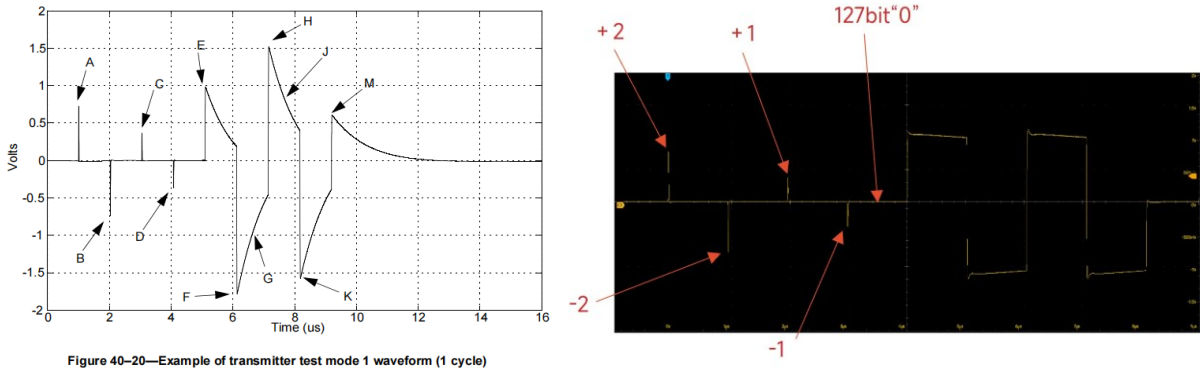
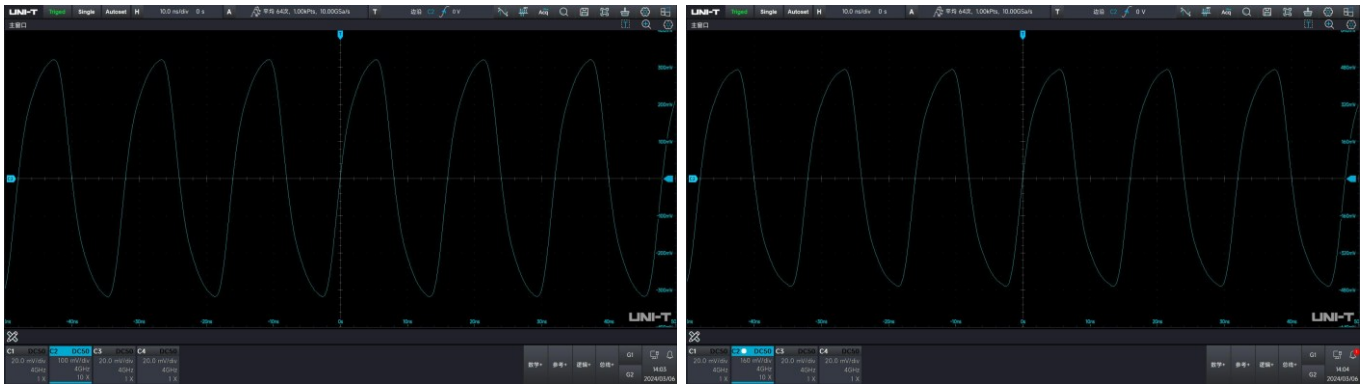


Figure 40–20—Example of transmitter test mode 1 waveform (1 cycle)

测试模式 2 和测试模式 3

测试模式 2 和测试模式 3 主要用于主从模式的抖动测试，主模式设备负责生成并发送时钟参考信号，控制数据传输的时序，从模式设备负责接收并回复主设备的时钟，并调整自身发送时序以匹配主模式。两种模式的信号都是以 125MHz 的频率发送【-2，+2】的时钟序列。



测试模式 2（左），测试模式 3（右）

测试模式 4

测试模式 4 主要进行失真测试，它是由特定的 2047 个连续码型组成，当测试模式 4 启动时，PHY 应传输由扰码多项式、位生成和电平映射生成的符号序列。

$$gs1 = 1 + x9 + x11$$

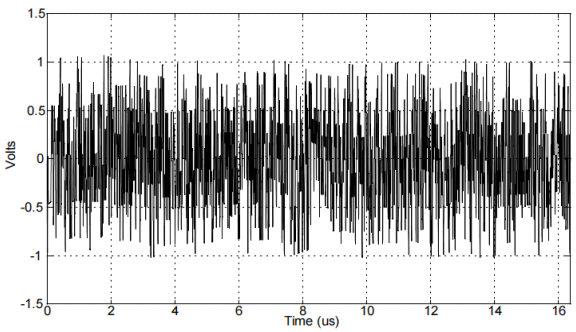
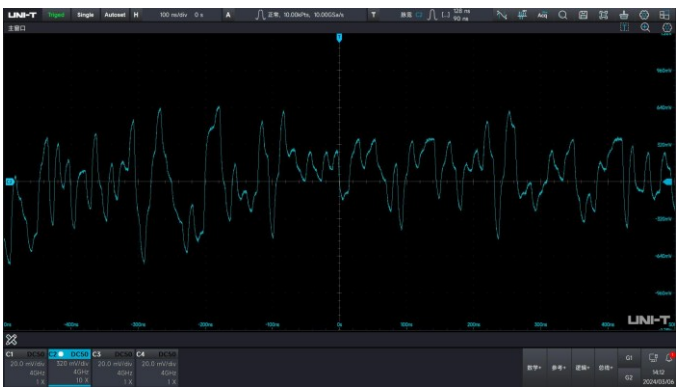


Figure 40–22—Example of Transmitter Test Mode 4 waveform (1 cycle)



1000BASE-T 测试内容及规范

优利德 CTS1000 一致性分析遵循 IEEE802.3ab 规范，包含电平电压、抖动、失真等完整的测试项目，方案涉及使用示波器、信号发生器、网络分析仪以及专业的以太网一致性分析夹具等多种测试设备、给用户提供完善的测试方案。

测试模式 1:

- 峰值电压测试（A、B、C、D）
- 峰值电压测试（加扰）(A、B、C、D)
- 模版测试（ A、B、C、D、F、H）
- 模版测试（加扰）(A、B、C、D、F、H)
- 顶降测试（G、J）
- 顶降测试（加扰）(G、J)

测试模式 2:

- 主模式抖动（有时钟，有滤波）
- 主模式抖动（有时钟，无滤波）
- 主模式抖动（无时钟，有滤波）
- 主模式抖动（无时钟，无滤波）

测试模式 3:

- 从模式抖动（有时钟，有滤波）【暂不支持】
- 从模式抖动（有时钟，无滤波）【暂不支持】
- 从模式抖动（无时钟，有滤波）
- 从模式抖动（无时钟，无滤波）

测试模式 4:

- 传输失真（有时钟）
- 传输失真测试（有时钟,有干扰）
- 传输失真（无时钟）
- 传输失真测试（无时钟,有干扰）
- MDI 共模电压输出测试
- MDI 回波损耗测试

注：有时钟的测试项目时钟很难从 DUT 直接引出，大部分用户选择使用示波器时钟恢复的方式进行测试，无时钟测试 1000MBASE-T 一致性分析支持，UT-GBE-FT 测试夹具暂不支持从模式抖动【有时钟】测量。

优利德 1000Base-T 一致性测试方案

1000BASE-T 一致性测试需要测试仪器及测试设备具有足够的配置，其中要求：

- 示波器：带宽：≥1GHz，采样率：≥5GSa/s，ADC 分辨率：≥12bit【**建议**】
- 有源差分探头：带宽：≥1GHz
- 信号发生器：带宽≥31.25MHz，输出幅度≥5.4Vpp，双通道
- 测试软件：执行自动化测试的一致性分析软件
- 测试夹具：符合协会规范的千兆以太网测试夹具

优利德 1000Base-T 一致性分析方案现可覆盖除从模式抖动【有时钟】测试外的所有测试，如果回波损耗测试或测试以太网线缆阻抗测试时，还需额外配置**网络分析仪**。

推荐示波器

优利德高带宽示波器为以太网一致性分析的测试做好准备，其优越的性能及快速指令响应速度将您的一致性分析测试缩短至十几分钟之内。其中 MSO8000HD/HDP 系列全系列搭载 12bit ADC，高速的 20GSa/s 采样让您看到更真实的以太网信号，8GHz 超高带宽将使您测试时不丢失任何信号幅度，凭借其优良的信号完整性，50mV/div 满带宽下底噪低至 800μV，超过 7 位的 ENOB 和精密的 150ps 固有抖动都将使您的一致性测试更具信心。



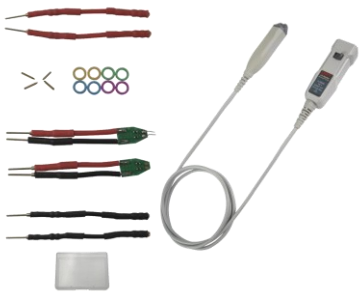
MSO8000HDP | 8GHz/CH | 20GSa/s/CH



MSO8000HD | 8GHz | 20GSa/s

推荐有源探头：

探头是执行一致性测试的测量系统的关键组件。优利德提供有源差分探头（UT-PD1500、UT-PD2500、UT-PD4000、UT-PD6000），可以接入带有精细间隙、难以接入元件的高密度电路板，同时保持最大的信号保真度。



UT-PD6000 | 6GHz | 73ps

UT-PD4000 | 4GHz | 88ps

UT-PD2500 | 2.5GHz | 150ps

UT-PD1500 | 1.5GHz | 245ps

信号发生器:

1000Base-T 与 100BASE-Tx 不同，需要使用干扰信号对其进行抗干扰能力测试，在千兆以太网一致性测试加扰测试时，对于模版测试需要 31.25MHz，2.8Vpp，传输失真测试时需要 20.833MHz，5.4Vpp 的正弦干扰，并且需要同时输出两路相位相差 180°信号，这对干扰信号的频率和幅度精确度要求极高。优利德 UTG9000T 带宽 600MHz，最高输出幅度 20Vpp，最小频率分辨率达 1μHz，并且支持多种调制、扫频和 PRBS 码型，支持相位同步输出，是一致性测试的不二选择。



UTG9000T | 600MHz | 2.5GSa/s | 4CH

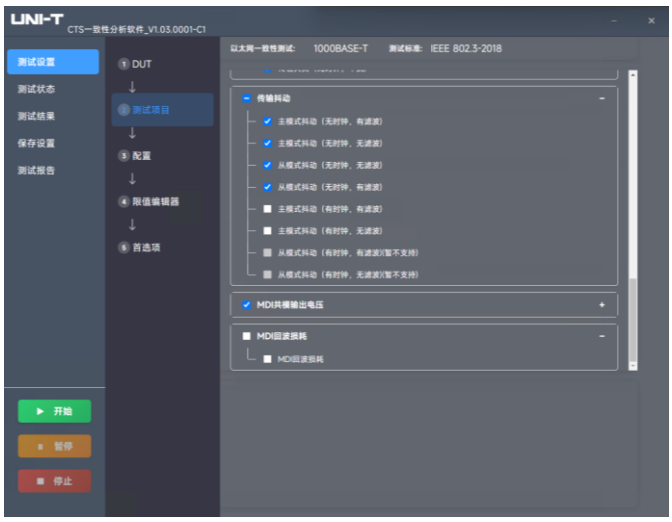
UTG9504T | 500MHz | 2.5GSa/s | 4CH

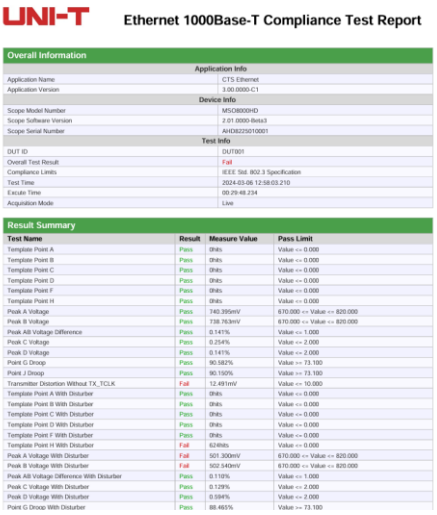
UTG9354T | 350MHz | 2.5GSa/s | 4CH

测试软件:

CTS1000 是优利德推出的 1000BASE-T 一致性分析软件，通过脚本语言自动化执行全部的一致性测试内容，有效地将用户手动执行一致性测试的时间大大缩短至十几分钟以内，软件具备自动判定、自定义编辑、自动报告生成，仅需简单设置即可在十几分钟内完成一致性分析并生成完整报告，减少用户干预。

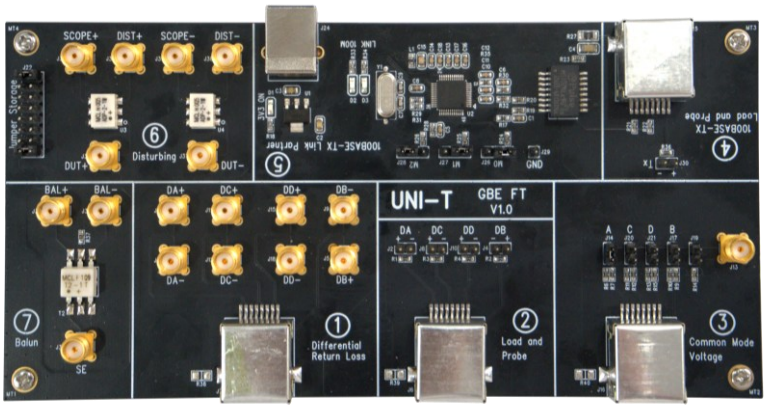
- 允许用户执行的单项或多项测试；
- 高度优化的直观用户界面，用户可视化的示波器和被测试连接流程，迅速配置测试，验证电气性能；
- 全自动化示波器测试流程，为每个测试项目自动设置示波器软件；
- 详细的测试报告带有结果、通过/失败信息、测试裕量和测试波形图像；
- 配置测试参数和迹线，进行调试和表征；
- 允许进行的多轮测试，验证分析测试结果；

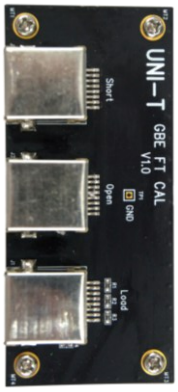




测试夹具：

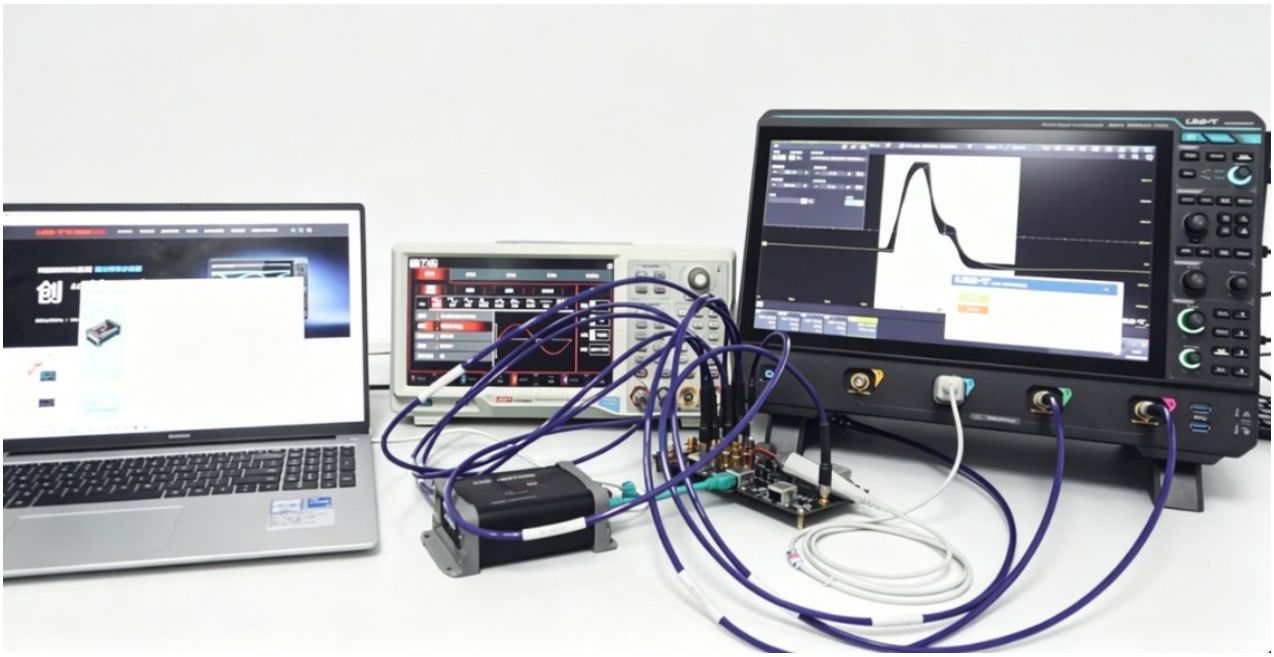
UT-GBE-FT 以太网测试夹具专为以太网一致性分析设计，同时满足 1000BASE-T 和 100BASE-Tx 的测试需求，夹具分为信号板和校准板。如下图：





1000BASE-T 一致性测试实例

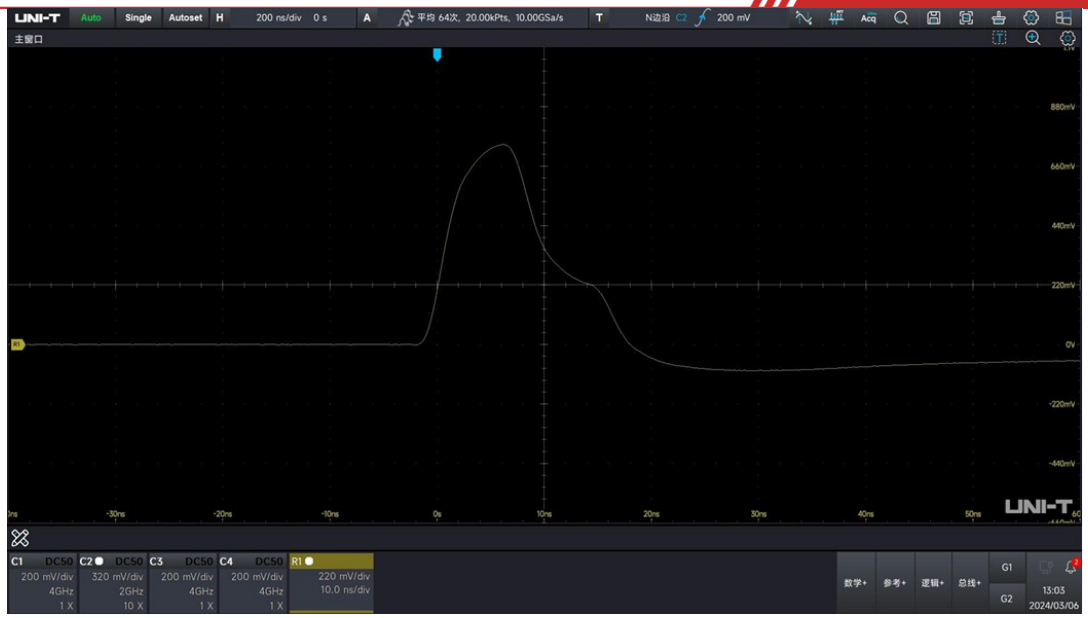
MSO8000HD-CTS1000 一致性分析软件全面实现信号质量测试过程自动化，允许设计人员快捷简便地执行测试。仅需为以太网信号选择要执行的测量，然后根据提示连接框图配置测试连接，测试软件消除了麻烦耗时的手动示波器设置、光标放置及与协议规范比较测试结果的过程。



上图实测一个车载网关转换器的 1000M 以太网接口，该转换器可将 1000M 工业以太网转化为车载以太网

峰值电压测试

峰值电压测试用于验证以太网接口是否有足够的驱动能量将信号传送 100m 距离。根据规范要求：A 与 B 点的峰值电压需要在 0.67~0.82V（150mV 容限范围），C 与 D 点的峰值电压需要在 0.335~0.41V（75mV 容限范围），且对称性必须良好，A、B 点的峰值电压差异不能超过 1%，C、D 点峰值电压差异不能超过 A 与 B 点平均值一半的 2%。该项测试需要测试 1000BASE-T 的所有 4 对双绞线。且需要在无干扰和注入干扰信号情况下测试，在进行干扰测试时，需要注入 31.25MHz，幅值为 2.8Vpp，相位相差 180°的正弦波作为干扰信号。



A 点无干扰峰值电压测试

模版测试

模版测试用于验证接口驱动能量是否具备 100m 传输能力以及上升时间是否足够快以满足足够的数据交换速度，同时还检查接口是否发射过多 EMI 辐射，超过了 FCC Class A 要求以及信号是否具有对称性。按规范要求，模版测试需要在无干扰和注入干扰信号的情况下测试，以模拟真实信号传输时收到邻道干扰的情况，信号注入与峰值电压测试相同。



F 点模版测试

顶降测试

顶降也叫最大输出衰落测试，主要对测试模式 1 信号 F 点后的 G 和 H 点后的 J 点进行电压测试，验证插入的磁损耗是否满足规范要求，该测试同样需要注入干扰信号，与上两节信号注入要求一致。

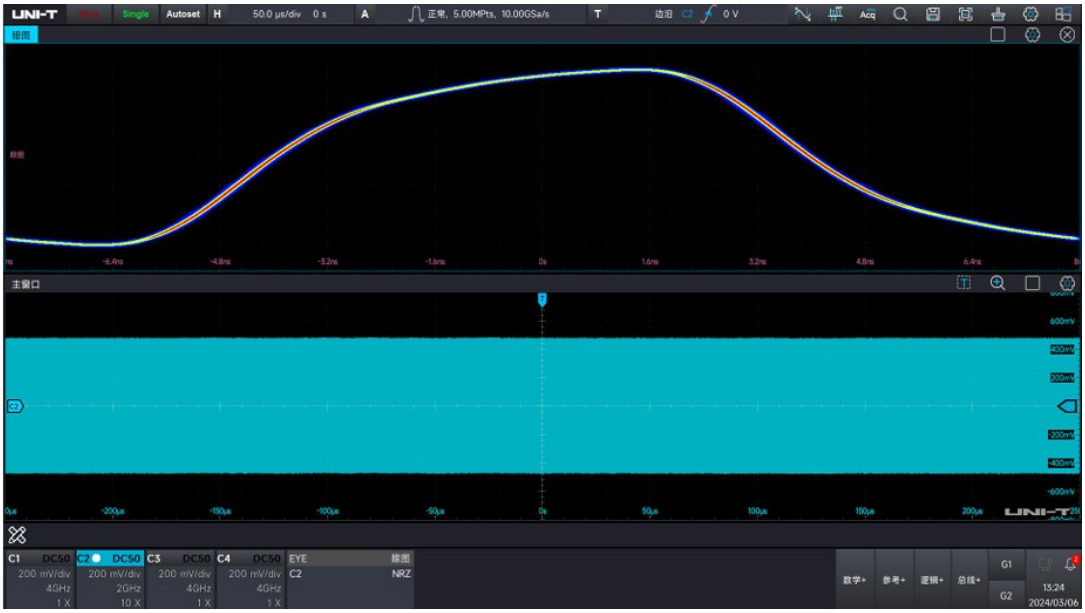
规范要求：G 点电压幅度应大于 F 点幅度的 73.1%，J 点电压幅度应 大于 H 点幅度的 73.1%。



测试加扰后 J 点的电压衰落

主模式抖动测试

主模式抖动测试主要对于普通模式下的 TX_CLK 时钟抖动以及测试模式 2 下的 MDI 数据抖动进行测试，该项测试分两步走，第一步测试无滤波的主模式抖动，如果在不滤波的情况下不通过规范测试，那么意味着在滤波情况下也不会通过规范要求，更容易告知您时钟系统的好坏。除了滤波和不滤波外，还分为有时钟和无时钟的抖动测试，有时钟的抖动需要将 TX_CLK 时钟信号引入示波器测量，无时钟测试则不需要引入时钟，只需配置 DUT 发出测试模式 2 的码型，通过示波器抖动分析功能计算并抖动裕量。



主模式未滤波的 MDI 数据抖动测试

从模式抖动测试

从模式抖动测试用于验证 DUT（Slave Mode）在有/无 TX_CLK 的情况下的抖动范围是否在规定范围之内。该测试需要配置 DUT 发出测试模式 2 和测试模式 3 波形。当 DUT 处于 Slave Mode 下，Salve TX_CLK 相对于 Master TX_CLK 的抖动的峰峰值应小于 1.4ns，当该抖动波形经过 32KHz 高通滤波器，滤波后的抖动+J_{txout} 应 < 0.4ns，并且需要大于经过主模式滤波的 Master 抖动值。



从模式滤波后的 MDI 数据抖动测试

传输失真测试

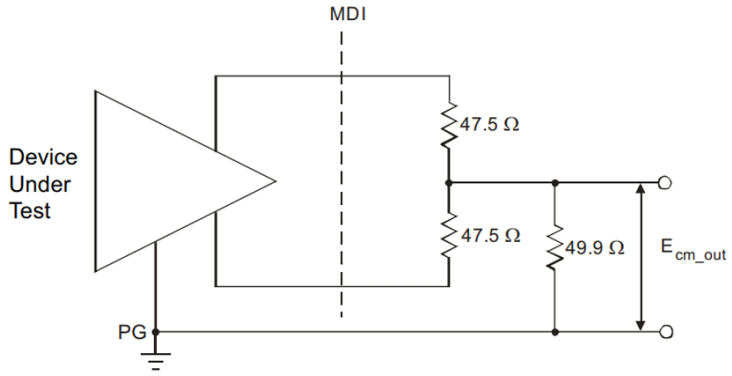
传输失真测试主要依据 IEEE802.3ab 规范要求对 DUT 在有/无 TX_CLK 和有/无信号干扰的情况下传输峰值失真测试，当进行干扰测试时，需要注入 20.833MHz，5.4Vpp，相位相差 180°的正弦波，将 DUT 配置为测试模式 4，示波器捕获波形后，针对每个传输码元以 TX_CLK 频率进行任意相位采样，并按照规范要求连续处理 2047 个连续采样点，要求在至少 60%的 UI 眼宽范围内的采样值的峰值失真应小于 10mV。



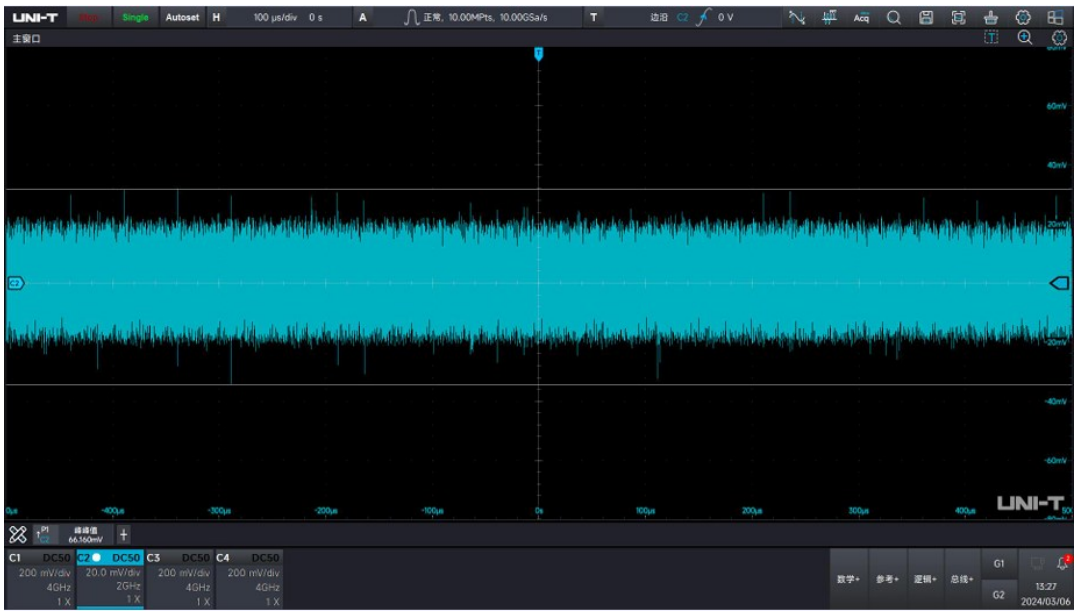
传输失真测试

MDI 共模电压输出测试

MDI 共模电压输出测试用于验证 DUT 在测试模式 4 下，MDI 共模输出电压峰峰值是否在一致性测试的限制范围内，规范要求，共模输出电压峰峰值需要 < 50mV。按规范要求，共模输出电压测试需要在下图所示匹配夹具电路进行测试。



共模输出电压测试电路

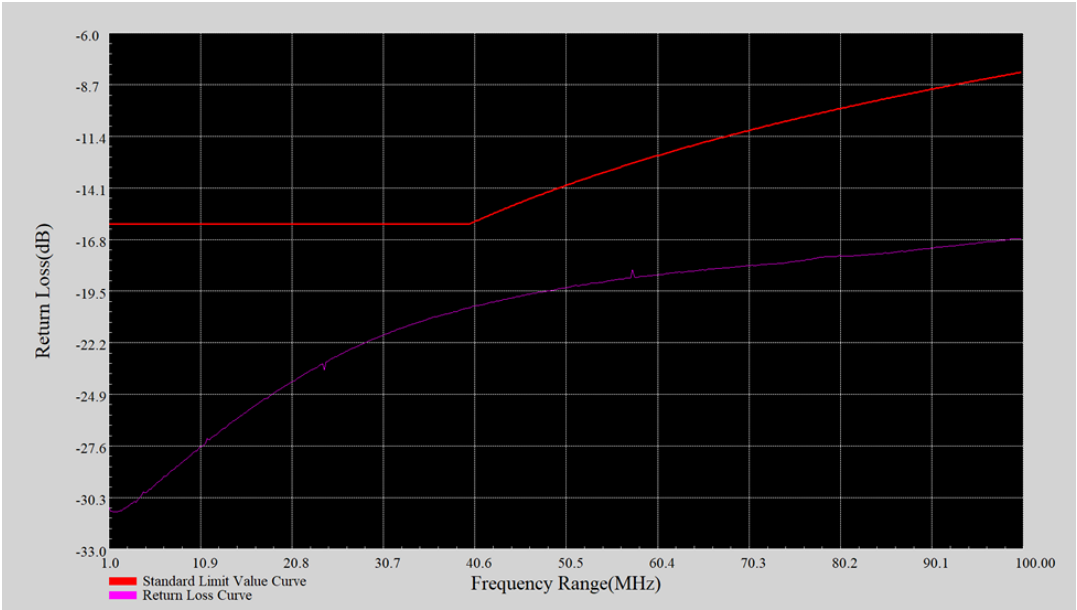


MDI 共模输出电压测试

MDI 回波损耗测试

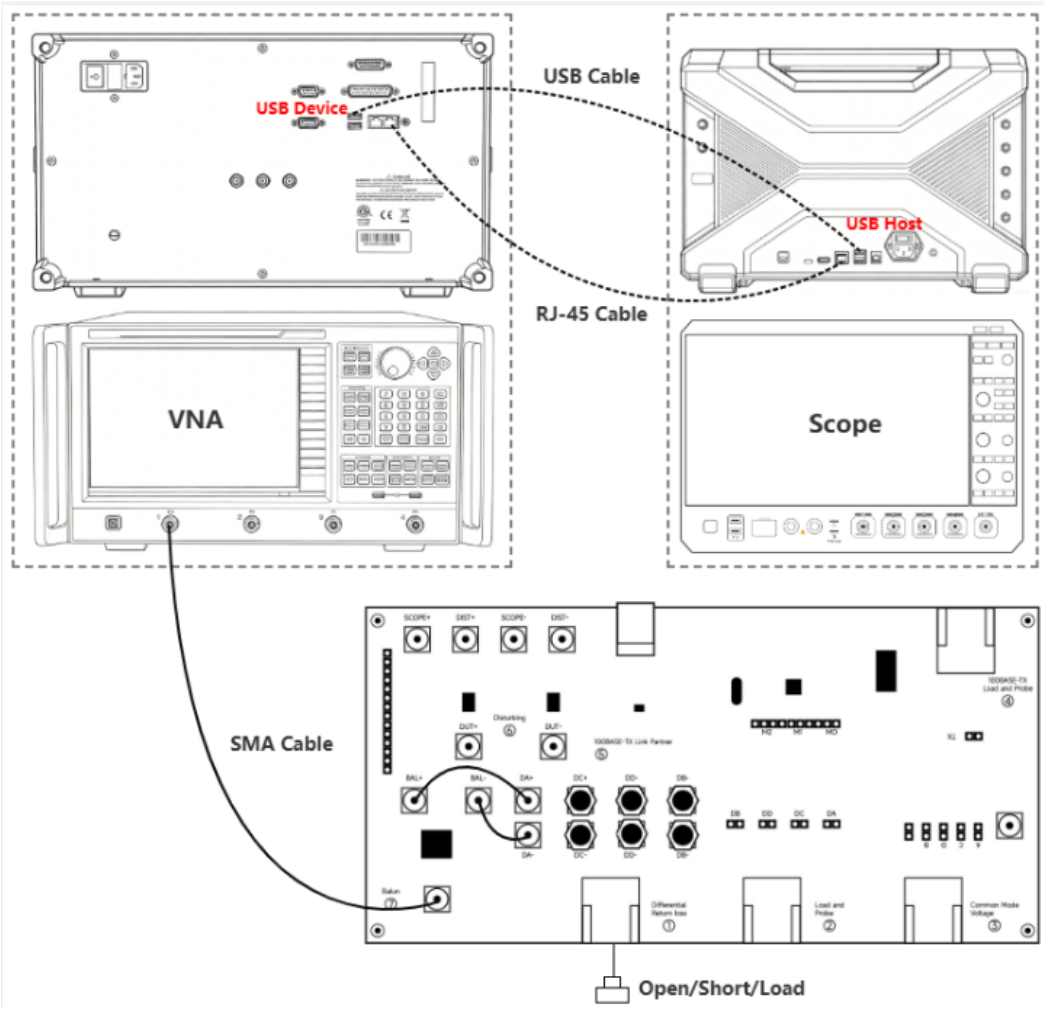
MDI 回波损耗用于验证 1000BASE-T 的传输回波损耗,要求在 1MHz-100MHz 范围内是否符合 IEEE802.3-2018，Subclause 40.8.3.1 规范要求的限制。测试需要使用网络分析仪进行测试。

为了完成该项测试，要求测试过程中 DUT 发出测试模式 4 波形。 规范要求：在 1MHz - 40MHz 范围内，回波损耗 < -16dB，40MHz - 100MHz 范围内回波损耗 <-（10-20lg（f/80））dB。



MDI 回波损耗校准

在进行回波损耗测试之前，首先要使用网络分析仪对夹具/测量线缆进行 OPEN、SHORT、LOAD 校准。



UT-GBE-FT 以太网一致性分析夹具提供了标准的校准附件，提供开路、短路和负载校准。



订购信息

优利德推出的 1000BASE-T 一致性分析方案具备高度自动化的测试控制流程，以直观的 UI 界面引导用户完成各项设置和操作，生成测试报告。您可以根据自己所需的测试场景配置您的测试方案。

第一步，先选择示波器，支持 1000BASE-T 一致性分析的示波器

UPO71304	13GHz，40GSa/s（每通道），4Gpts
UPO71004	10GHz，40GSa/s（每通道），4Gpts
MSO8804HDP	8GHz，20GSa/s（每通道），4Gpts
MSO8604HDP	6GHz，20GSa/s（每通道），4Gpts
MSO8804HD	8GHz，20GSa/s，2Gpts
MSO8604HD	6GHz，20GSa/s，2Gpts
MSO8504HD	5GHz，20GSa/s，2Gpts
MSO7308HD	3GHz，10GSa/s，1Gpts，8CH
MSO7208HD	2GHz，10GSa/s，1Gpts，8CH
MSO6204HDP	2GHz，10GSa/s，1Gpts
MSO6104HDP	1GHz，10GSa/s，1Gpts

第二步，选择 1000BASE-T 分析软件

JITTER	抖动分析和眼图选件
CTS1000	1000BASE-T 以太网一致性分析选件（需选择抖动分析和眼图选件）

第三步，选择 1000BASE-T 测试夹具

UT-GBE-FT	100/1000M 以太网一致性分析夹具

第四步，选择信号发生器，推荐

UTG9604T	4 通道 600MHz 函数/任意波形发生器
UTG9504T	4 通道 500MHz 函数/任意波形发生器
UTG9354T	4 通道 350MHz 函数/任意波形发生器

第五步，选择用于测试的示波器探头，推荐

UT-PD6000/4000	6/4GHz 有源差分探头
UT-PD2500/1500	2.5/1.5GHz 有源差分探头

第六步，需用户自配置的设备

相位匹配 SMA 线缆×6，连接示波器和测试夹具
以太网线缆，带时钟的抖动测试项需要一条 103m 长的以太网线缆

第七步，如需执行 MDI 回波损耗测试，则需选购网络分析仪，推荐

VNA4094	4 端口，100k~9GHz
VNA4092	2 端口，100k~9GHz

若需要选件和测试方案详情请咨询优利德销售或经销商