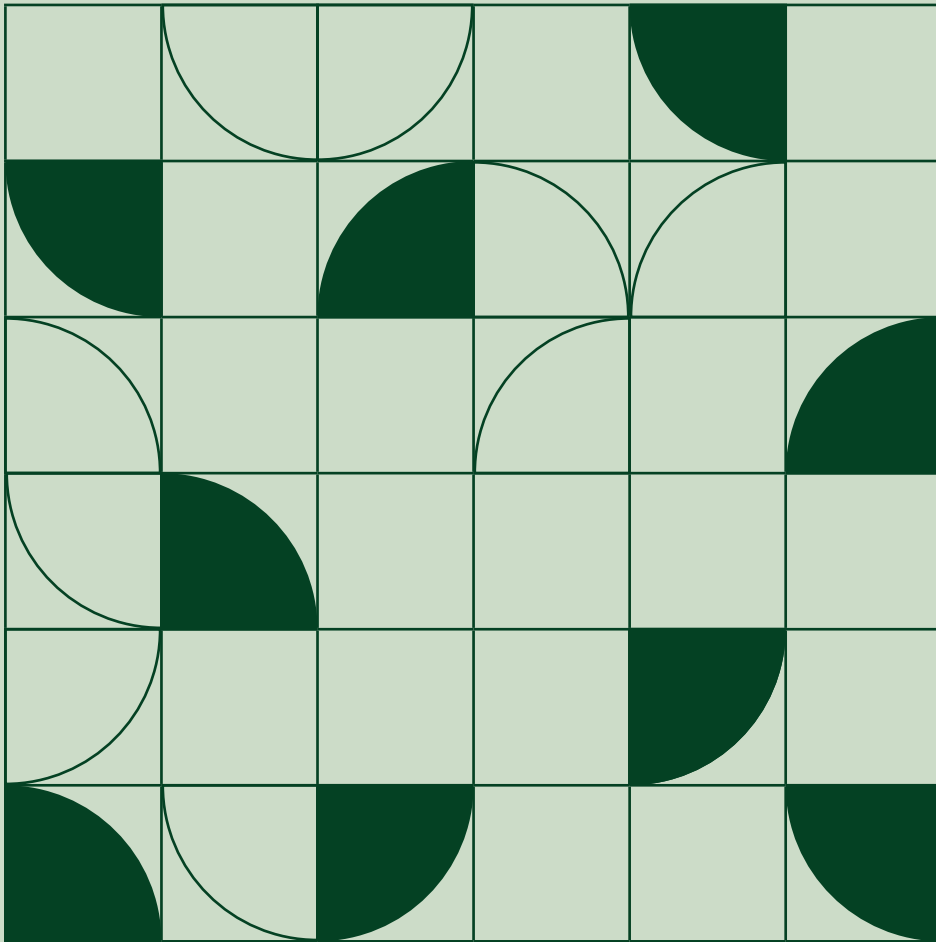


仪器选择



02 简介

03 模拟和射频仪器

需考虑的关键规格

模拟和射频仪器类别

并行与串行标准比较

数字仪器类别

10 规格参数

选择总线类型

带宽

延迟

GPIO

USB

PCI

PCI Express

以太网/LAN/LXI

定时和同步

引言

工程师们普遍认同:工欲善其事,必先利其器。如果使用的工具不当,可能会浪费时间并影响质量,而运用适当的工具则可在短时间内获得预期的成效。

在构建自动化测试系统时,使用的主要工具是测量仪器。这些仪器包括数字万用表(DMM)、示波器和波形发生器等大家耳熟能详的仪器,以及各种新的和不断变化的产品类别,如矢量信号收发仪和多功能一体式示波器。

为了选择合适的仪器,技能熟练的测试工程师必须对以下方面有着深入的了解:

- 待测设备(DUT)的技术测量要求
- 会影响应用的关键仪器规格
- 市面上的各种仪器类型,以及功能、尺寸、价格等方面的权衡
- 特定仪器类别中产品型号之间的细微差异

为工作选择合适的工具知易行难,尤其是需要了解和权衡许多因素时更是如此。本指南介绍了市面上仪器的主要类别,以及常见的选择标准,可帮助您缩小选择范围,从而选出最适合应用的仪器。

模拟和射频仪器

模拟和射频测试仪器的范围非常广泛，分为数百个产品类别，共计数千种产品型号。而且，这些仪器也受相关物理定律的制约，即体现在放大器技术和制造仪器所需的模数转换器(ADC)上的噪声与带宽的基本原理。由于存在这些基本的物理限制，工程师经常需要在测量精确度和数据采集速度之间进行取舍。下图显示的是随着传统和模块化仪器的技术进步，速度与分辨率之间的关系如何随着时间的推移而变化。

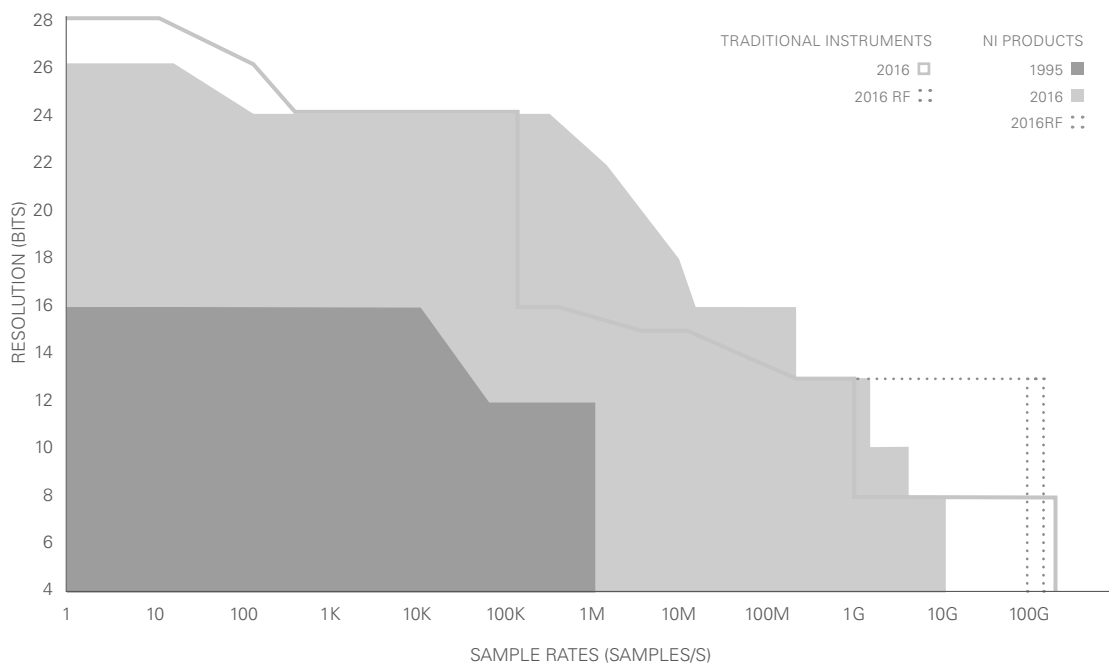


图1 仪器的分辨率与采样率

模拟和射频仪器类别

图1中的曲线代表了不同仪器类别的示例。DMM位于图的左上角，能以低速提供高精度，示波器位于图的右下角，能以较低分辨率进行高频采集，而数据采集(DAQ)产品位于图的左下角，具有更高的通道密度和更低的成本。

如果要确定从哪个类别的仪器开始研究，首先要考虑与测量任务相关的几个关键问题：

- 信号的方向是什么？(输入、输出或两者皆有)
- 信号的频率是多少？(DC、千赫、兆赫或千兆赫)

在确定关于方向和速度的这两个关键问题的答案后，便可参考表1来确定从哪种类型的仪器开始着手。

模拟仪器类别

	DC和电源	低速模拟	高速模拟	RF和无线
输入, 测量	数字万用表	模拟输入, 数据采集(DAQ)	示波器、频率计数器	RF分析仪 功率计 (频谱分析仪、矢量信号分析仪)
输出, 生成	可编程电源	模拟输出	函数/任意波形发生器 (FGEN、AWG)	RF信号发生器 (矢量信号发生器、连续波源)
同一设备上的输入和输出	DC电源分析仪	多功能数据采集设备 (多功能DAQ)	多功能一体式示波器	矢量信号收发仪(VST)
同一引脚上的输入和输出	源测量单元(SMU)	LCR测试仪	阻抗分析仪	矢量网络分析仪(VNA)

这个图表虽然有用, 但包含的仪器类型有限, 特别是缺少垂直规格或特定用途的仪器。

该表并未提及但值得注意的一些领域包括:

- 专用直流仪表, 如静电计、微欧姆计、纳伏表等
- 音频频带分析和生成(也称为动态信号分析仪)
- 专业模拟产品, 包括脉冲发生器、脉冲源/接收器等

需考虑的关键规格

当为测量任务选定特定仪器类别之后, 下一步是对该类别的产品进行比较和权衡, 需考虑的要求包括:

- **信号范围、隔离和阻抗**—首先, 确保仪器的输入信号范围足够大, 能够捕获感兴趣的信号。此外, 需考虑仪器的输入阻抗以及仪器与地面的隔离, 前者会影响测量装置的负载和频率性能, 后者会影响抗噪声性和安全性。
- **模拟带宽和采样率**—接下来, 确保仪器的模拟带宽(以千赫、兆赫或千兆赫为单位)能够传递感兴趣的信号, 并且ADC的采样率足够快, 能够捕获感兴趣的信号(以每秒样本数表示, 例如每秒千个样本、每秒百万个样本或每秒十亿个样本)。
- **测量分辨率和精度**: 最后, 评估仪器垂直规格中影响测量质量的多个参数, 如ADC分辨率(模拟信号的数字量化, 通常在8位至24位之间)、测量精度(最大测量误差随时间和温度的变化, 一般以百万分之一或百万分率表示)和测量灵敏度(可检测的最小变化, 通常以绝对单位表示, 例如微伏)

对于在量程、精度和速度等功能维度表现出色的仪器，可能需要在价格、尺寸、功耗和通道密度方面进行取舍，而所有这些因素都会影响仪器的实用性。

图2显示了通用测量仪器的模拟输入路径简图，包含四级主要输入、每一级影响的仪器规格，以及每一级影响的典型DMM和典型示波器的仪器规格示例。

下方的简图概括了筛选仪器规格时的一些思路，这些规格通常使用各种仪器类别和仪器供应商的各种不同命名法来表示。这些级在影响关键规格时通常是相互依存的。例如，输入放大器还可以影响仪器的输入带宽和有效分辨率。类似地，仪器的输入阻抗可能对带宽具有显著影响。

模拟仪器的四级输入

	输入隔离和端接	输入耦合和滤波	输入放大器	模数转换器(ADC)
规定的产品规格	隔离输入阻抗	AC/DC耦合 模拟带宽	最大电压范围 最低电压灵敏度	采样率 分辨率
DMM示例:	隔离电压高达330 V Cat II, 10 MΩ(可选择)	DC耦合 200 kHz带宽	高达300 V输入 低至10 nV灵敏度	10k Hz读取速率 6½位数(24位)分辨率
示例: 示波器:	接地参考50 Ω或1 MΩ(可选择)	DC或AC耦合(可选择) 350 MHz带宽	高达40 V _{pp} 输入 低至1 mV灵敏度	高达5 GS/s采样率 8位分辨率

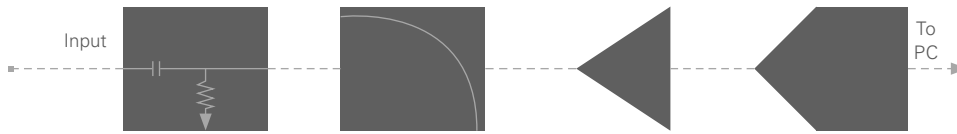


图 2 | 模拟仪器的四级输入

模拟和射频仪器类别

在比较DUT的测量要求以及仪器测试DUT的能力时，请记住以下关键比率。

测试准确度比= 4:1

当测试组件(例如测量组件的参考电压)时，请确保测量设备的准确度远远高于待测组件的准确度。如果不满足该标准，则测量误差可能是由DUT和测试设备两方面引起的，因此便无法找到确切的误差源。出于这一原因，需要采用测试准确度比(TAR)这一概念来描述测量设备和待测组件的相对准确度。

可接受的TAR值为4及以上，具体取决于所执行的测试和所需的测试确定度。

$$TAR = \frac{\text{待测组件所需的准确度}}{\text{测量设备的准确度}}$$

带宽比= 5:1

上升时间和带宽直接相关，其中一个值已知的情况下，就可以计算出另一个值。上升时间定义了信号从满量程值的10%上升到90%所需的时间。

使用以下公式，可根据上升时间计算出信号的带宽：

$$\text{带宽} = \frac{0.35}{\text{上升时间}}$$

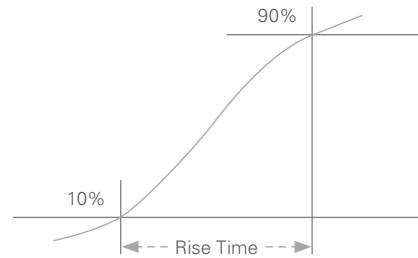


图 3 模拟信号上升时间

理想情况下，所用数字化仪的带宽应该是信号带宽的三到五倍，如上式所计算。换句话说，数字化仪的上升时间应该是信号上升时间的1/5到1/3，才能以最小的误差采集信号。

您可以随时使用以下公式可进行逆推，确定信号的实际带宽：

$$T_m = \sqrt{T_s^2 + T_d^2}$$

T_m =测得的上升时间，

T_s =实际信号的上升时间，

T_d =数字化仪的上升时间

时域采样率= 10:1

带宽描述了可以以最小衰减进行数字化的最高频率正弦波，而采样率仅仅表示数字化仪或示波器中的ADC提供时钟以对输入信号进行数字化的速率。采样率和带宽不直接相关；然而，可遵循以下通用原则，在这两个重要参数之间建立所需的关系：

数字化仪的实时采样率=
输入信号带宽的10倍

奈奎斯特定理指出，为了避免混叠现象，数字化仪的采样率需要至少是被测信号最高频率分量的两倍。然而，采样率只为最高频率分量的两倍并不足以精确地再现时域信号。为了准确地对输入信号进行数字化处理，数字化仪的实时采样率至少应为数字化仪带宽的3到4倍。具体原因请看下图，并思考您希望在示波器上显示哪种数字化信号。

虽然在两种情况下通过前端模拟电路的实际信号都是相同的，但是左图属于欠采样，会使数字化信号失真。相反，右图具有足够的采样点，可以精确地重建信号，从而实现更精确的测量。清晰地表示信号对于上升时间、过冲或其它脉冲测量的时域应用非常重要，因此采样率更高的数字化仪更适用于这些应用。

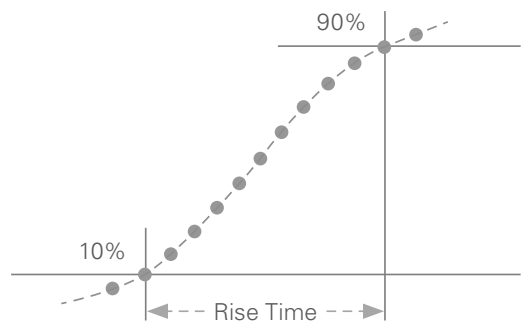
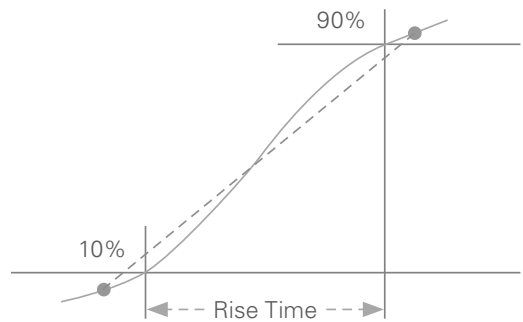


图 4 右图显示的是采样率足够高的数字化仪，可精确地重建信号，从而实现更精确的测量。

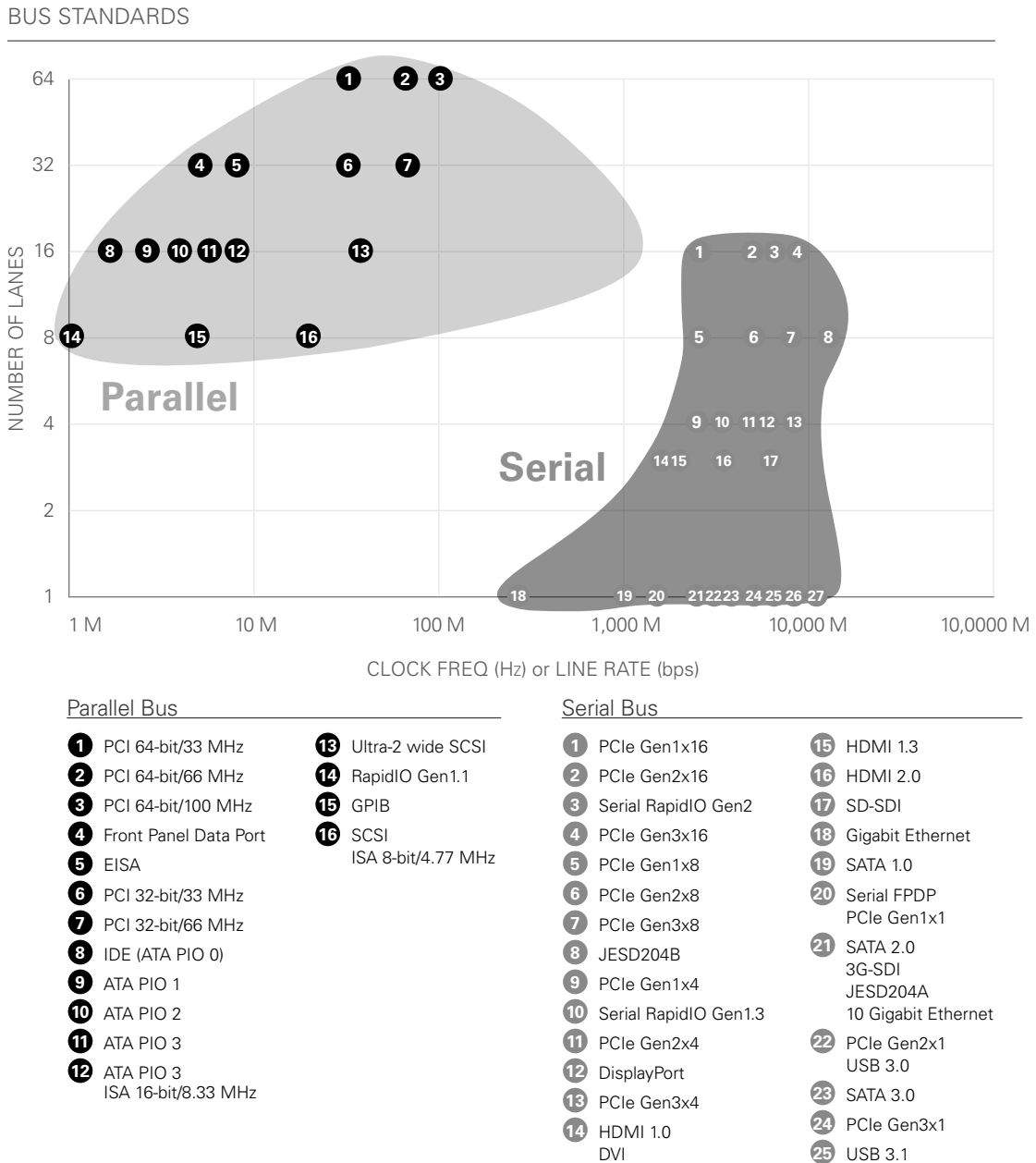
数字仪器

在电子功能测试环境中，数字仪器用于与数字协议连接并测试协议的电气特性和通信链路特性。影响仪器是否适用于特定任务的一个最关键的因素是，仪器采用并行还是串行数字通信。

并行与串行标准比较

由于1 GHz至2 GHz附近的并行总线时钟频率存在物理限制，串行标准越来越受欢迎。这是因为由各个时钟和数据线引入的偏移会以更快的速率引起误码。高速串行总线会以单个差分信号形式发送同时包含数据和时钟信息的编

码数据，从而避免了并行总线的速度限制。它会将数据进行串行化处理并以更快的速率发送，有助于减少集成电路(IC)的引脚数，从而减小尺寸。此外，串行通道可以以快得多的时钟速度运行，它们还可以实现比并行总线更高的数据吞吐量。



5 该图显示了一些常见的总线标准及其通道数量与线路速率的关系。串行标准的线路速率远远高于并行标准，从而可实现更高吞吐量。

数字仪器类别

与模拟仪器一样，您可以通过回答几个关键问题来缩小数字仪器的选择范围：

- **需要完成什么任务?** (数字连接、定制数字连接或电气和定时测试)
- **链路的速度有多快?** (静态和kbps、Mbps或Gbps)

	静态, 低速	同步与高速并行(100 MBPS范围)	高速串行(10 GBPS范围)
接口(标准)	低速标准接口卡(I2C, C) 同步协议接口 (ARINC 429、CAN、GPIB、I2C、SPI)		接口卡(10千兆比特以太网、 光纤通道、PCI Express等)
接口(自定义)	数字I/O (GPIO)	数字波形发生器/分析仪, 信号发生器	基于FPGA的高速串行接口 Aurora、Serial Rapid I/O、 JE5D204b
电气测试和定时测试(基本接口)	数字引脚电子器件, 单引脚参数测量单元(PPMU)		BERT, 示波器

硬件定时与软件定时

数字通信方案主要通过两种方法实现：软件定时和硬件定时。软件定时应用的输入输出不需要使用任何类型的时钟。软件负责控制I/O，而编程语言则通过软件来控制定时。这种编程语言通常在操作系统上运行，可能需要数毫秒来执行软件调用。对于软件定时，可以使用操作系统定时器来确定定时操作的速率。通常，报警、电机和报警器的监测和控制等低速应用使用软件定时。

有两种类型的软件定时通信可供选择：确定性控制和非确定性控制。使用实时操作系统，可以实现高达1 μs的精确度；但是，实时操作系统不会提高通信速率，仅仅是增加确定性。非实时系统，如Microsoft Windows，是非确定性的。在这些系统中，软件命令在硬件中执行所花费的时间是不一致的，并且可能要花费数毫秒。计算机内存、处理器速度和在操作系统上运行的其他应用程序等因素都可能影响执行所需的时间。

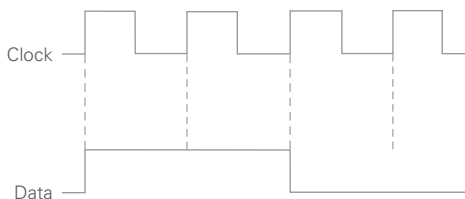


图 6 通过硬件定时操作，您可以利用实时、确定的数字信号输出。

相比之下，硬件定时设备使用时钟的上升沿或下降沿确定性地生成或采集数据。您可以使用此类定时设备，以非常高的确定性在千兆位每秒的速率下采集或生成数字数据，并且可以在预确定的位置可靠地输出数据。

使用硬件定时的应用包括：

- 芯片测试
- 协议仿真和测试
- 数字视频和音频测试
- 数字电子测试

时钟速率

时钟速率是硬件定时数字应用的一个重要考量因素。如果设备所能达到的最大时钟速率不够快，将很难弥补。您可以使用NI高速数字I/O设备实现高达200 MHz的单端信号采样速率和高达200 MHz的差分信号，从而实现协议测试、数字音频和视频测试以及数字电子测试等。当设备可能无法满足串行数据流所需的时钟速率要求时，可以使用串行/解串器(SERDES)来采集更高频率的数字信号。但是，根据使用的SERDES类型，采用SERDES可能会减少可用线路的数量。

规格参数

除了认识从物理角度进行正确测量所需的模拟前端外，您还需要采用稳定、可重复、快速且能连接PC的仪器(这是工作的一部分)。

这有助于您根据场景/环境做出决定：

- 试验台和实验室—准确性、可重复性、底层控制、易于安装且能够自动执行重复测试
- 制造车间—速度、吞吐量、准确度、通过编程接口进行优化，以及调试

显然，就如何选择实验室与制造车间所需的仪器而言，有着相似之处和不同之处。人们通常会根据终端部署的一系列主要成功标准对仪器的规格参数进行评估。以下是可能适用于制造环境的一组典型的评估标准。

硬件部署检查清单

功能需求	测试工程记录
仪器, 需要I/O?	
处理, 需要计算?	
数据吞吐量, 存储空间是多少?	
是否同步?	
未来有哪些要求?	
在未来几年需要部署的系统数量有多少?	
计划支持的年限有多长?	
复制的全球站点数量是多少?	
部署场景的环境稳定性如何?	
初始设置、配置和维修如何管理?	
是否支持机架式安装?	
尺寸、重量和功耗是多少?	
采用何种连接件和连接类型?	

选择总线类型

今天，USB、PCI Express和以太网/LAN作为仪器控制的有效通信选项而备受关注。有些测试和测量供

应商和行业权威人士称，这些总线中的某一种，其本身就代表了所有仪器需求的解决方案。实际上，未来的测试和测量系统很可能仍然会同时采用多种总线技术，因为每种总线都有独特的优势。

带宽

在考虑其他总线的技术优点时，带宽和延迟是需要考虑的两个最重要的总线特性。带宽衡量的是通过总线发送数据的速率，通常以兆字节每秒为单位。高带宽总线在给定周期内传输的数据比低带宽总线更多。大多数用户都认识到了带宽的重要性，因为带宽会影响能否以采集和生成速率在总线与共享主机处理器之间传输数据，同时还决定着仪器所需的板载内存。带宽对于复杂波形生成和采集等应用以及RF和通信应用十分重要。高速数据传输对于虚拟和合成仪器架构尤其重要。虚拟或合成仪器的功能和特性由软件定义；在大多数情况下，这意味着数据必须移至主机PC进行处理和分析。图7显示了本指南中介绍的所有仪器总线的带宽(和延迟)。

延迟

延迟衡量的是通过总线传输数据产生的延迟。打个比方，如果将仪器总线比作高速公路，带宽则对应于车道数量和行驶速度，而延迟则对应于入口匝道和驶出匝道引入的延迟。低(越低越好)延迟总线在一端发送数据与另一端处理数据之间产生的延迟较短。延迟虽然比带宽更难以观测，但是会直接影响需要通过总线快速连续地发送间断性短命令的应用，例如DMM和开关之间的握手以及仪器配置等。

GPIB

IEEE 488总线(通常称为GPIB)是专为仪器控制应用而设计且经过验证的总线。作为一种强大可靠的通信总线，GPIB已经应用了30年，由于具有低延迟和可接受的带宽，至今仍然是仪器控制中最常应用的通信总线。GPIB目前在行业中的应用最为广泛，市场上有10,000多种仪器型号采用GPIB连接。

GPIB的最大带宽约为1.8 MB/s，非常适合用于独立仪器的通信和控制。最新的高速版本HS488将带宽提高至8 MB/s。数据传输基于消息实现，这些消息通常采用ASCII字符的形式。多台GPIB仪器可以通过电缆连接，总距离可长达20 m，并且带宽由总线上的所有仪器共享。虽然带宽相对较低，但GPIB延迟显著低于(优于)USB，尤其低于以太网。GPIB仪器在连接到系统后不会自动检测或自动配置；但是GPIB软件仍是最佳选择之一，而且坚固耐用的电缆和连接器也适用于恶劣的物理环境。无论是实现现有设备自动化的应用，还是需要高度专业化仪器的系统，GPIB都是它们的理想选择。

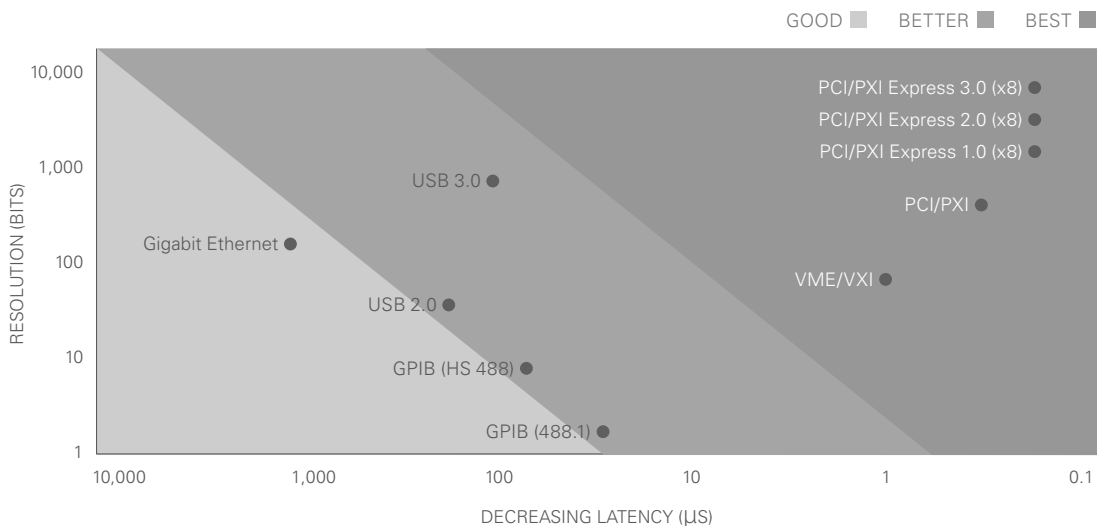


图 7 不同仪器总线的带宽和延迟关系图

USB

USB近年来已广泛用于连接计算机外设。这种趋势已经扩展到测试和测量领域，越来越多的仪器供应商在仪器中添加了USB设备控制器功能。虽然大多数笔记本电脑、台式机和服务器可能配有多个USB端口，但这些端口通常都连接到同一个主机控制器，因此USB带宽要由所有端口共享。

USB的延迟相对较短(介于延迟最长的以太网和延迟最短的PCI和PCI Express之间)，并且电缆长度最长为5 m。USB设备可自动检测，这意味着与LAN或GPIB等其他技术不同，当用户将USB设备连接至PC时会立即被PC识别和配置。在本文所介绍的所有总线中，USB连接器的可靠性和安全性最低。可能需要使用外部电缆扎带将其固定到位。

USB设备非常适合于需要采用便携式测量、笔记本电脑或台式数据记录以及车载数据采集的应用。USB普遍应用于PC并且具有即插即用的易用性，因此已经成为独立仪器普遍采用的通信总线。USB测试和测量类(USBTMC)产品规范可满足各种测试和测量设备的通信要求。

PCI

在本文介绍的所有仪器总线中，PCI和PCI Express的带宽和延迟性能最为出色。PCI带宽为132 MB/s，由总线上的所有设备共享。PCI延迟性能非常出色，以700 ns为基准，而以太网延迟为1 ms。PCI总线基于寄存器进行通信。与本文提到的其他总线不同，PCI不能连接外部仪器。它是一种用于PC插入卡和模块化仪器系统(如PXI)的内部PC总线，因此无法直接测量通信距离。尽管如此，当连接到PXI系统时，使用NI光纤MXI接口，PCI总线可以延长至200 m。因为PCI连接位于计算机内部，我们可以认为，连接器的可靠性受其所在PC的稳定性和耐用性限制。

PXI模块化仪器系统基于PCI信号构建，通过高性能背板连接器和多个螺栓端子增强了连接性，保持连接到位。在插入PCI或PXI模块后启动，Windows就会自动检测并安装模块的驱动程序。通常，PCI仪器的成本较低，因为它们依赖于托管它们的PC的电源、处理器、显示器和存储器运行，而不是将以上硬件并入仪器本身中。

PCI Express

PCI Express和PCI类似，是PCI标准的最新版本。因此，前文对PCI的大部分评价也适用于PCI Express。

PCI和PCI Express性能的主要区别在于PCI Express具有更高的带宽，并为每个设备提供专用带宽。在本指南涵盖的所有总线中，只有PCI Express为总线上的每个外设提供专用带宽。而对于GPIB、USB和LAN，带宽均由所连接的外设共享。数据通过点对点连接传输，这些连接称为通道，第1代链路每个方向的传输速率为250 MB/s。每个PCI Express链路可以由多个通道组成，因此PCI Express总线的带宽取决于其在插槽和设备中的实现方式。x1链路(单个通道)、x4链路和x16链路分别提供250 MB/s、1 GB/s和4 GB/s的专用带宽。PCI Express实现了软件向后兼容性，意味着迁移到PCI Express标准的用户可以保留其采用PCI时进行的软件投资。PCI Express也可通过外部电缆进行扩展。

高速的内部PC总线专为快速通信而设计。因此，PCI Express是需要高带宽的高性能数据密集型系统的不二之选，也是集成和同步多种类型仪器的理想选择。

以太网/LAN/LXI

以太网长期以来一直用于仪器控制。它是一种成熟的总线技术，已广泛用于测试和测量以外的其他许多应用领域。100BASE-T以太网理论上的最大带宽为12.5 MB/s。千兆以太网或1000BASE-T将最大带宽提高到125 MB/s。在所有情况下，以太网带宽都在网络上共享。125 MB/s千兆以太网的速度在理论上要比高速USB快，但是当多台仪器和其他设备共享网络带宽时，该性能会迅速下降。以太网总线基于消息进行通信，其中通信数据包显著增加了数据传输的开销。因此，以太网的延迟性能在本指南所介绍的总线技术中最差。

尽管如此，以太网仍然是创建分布式系统网络时的上佳之选。在不使用中继器的情况下，以太网的工作距离长达85 m到100 m，在使用中继器时不存在距离限制。它与控制PC或平台的分离距离是其他总线无法比拟的。与GPIB一样，以太网/LAN无法进行自动配置。您必须以手动方式为仪器分配IP地址和进行子网配置。与USB和PCI一样，以太网/LAN连接也普遍应用于现代PC中。这使得以太网非常适用于分布式系统和远程监测应用。它通常与其他总线和平台技术结合使用，用以连接测量系统节点。这些本地节点本身可以由基于GPIB、USB和PCI的测量系统组成。物理以太网连接的可靠性高于USB连接，但不如GPIB或PXI。

LXI (LAN在仪器领域的扩展)是一种基于LAN的新兴标准。LXI标准定义了采用以太网连接的独立仪器的规范，增加了触发和同步特性。

尽管从概念上说，将某个总线或通信标准指定为最终或理想技术较为方便，但历史经验表明，多种替代标准可能会持续共存，因为每种总线技术都有其独特的优点和缺点。表4汇总了前文所述各种总线的性能标准。我们应该清楚，没有一种总线的所有性能指标都优于其他总线。

您可以创建混合测试和测量系统，将来自模块化仪器平台(如PXI和独立仪器)的组件相结合，并通过GPIB、USB和以太

网/LAN进行连接，从而充分发挥多种总线和平台的优势。创建和维护混合系统的一个关键是，实现一个能够透明地识别多种总线技术并利用开放的多供应商计算平台(例如PXI)的系统架构，以实现I/O连接。

成功开发混合系统的另一个关键是，确保在驱动程序、应用程序和测试系统管理级别选择的软件具有模块化设计。虽然有些供应商可能为特定仪器提供垂直软件解决方案，但最有用的系统架构是将软件功能分解为可互换的模块化层，从而使系统既不依赖特定硬件，也不依赖特定供应商。这种分层方法有助于最大限度地实现代码复用和模块化，并能延长使用寿命。例如，虚拟仪器软件架构(VISA)是一种不依赖于供应商的软件标准，用于配置和编程基于GPIB、串行(RS232/485)、以太网、USB和/或IEEE 1394接口的仪器系统以及对其进行故障排除。VISA是一款非常有用的工具，因为对于各种通信接口而言，用于编程VISA函数的API都是类似的。

借助混合系统，您可以结合许多类型仪器的优势，包括传统设备和专用设备。虽然找到通用的仪器解决方案非常有吸引力，但在现实中，您需要采用合适的仪器和相关总线技术来满足特定的应用需求。

总线性能对比

	带宽(MB/s)	延迟(μs)	距离(M)(不带延长器)	设置和安装	连接器坚固性
GPIB	1.8 (488.1) 8 (HS488)	30	20	好	最好
USB	60 (USB 2.0)	模拟输出	5	最好	好
PCI (PXI)	132	0.7	内部PC总线	较好	较好 最好(PXI)
PCI EXPRESS (PXI EXPRESS)	250 (x1) 4,000 (x16)	0.7 (x1) 0.7 (x4)	内部PC总线	较好	较好 最好(PXI)
以太网/LAN/LXI	12.5(快速) 125(千兆比特)	1,000(快速) 1,000(千兆比特)	100 m	好	好

定时和同步

PXI平台是一种模块化的标准测试和测量平台，为集成定时和在仪器之间同步提供了一个很好的例子。PXI Express保留了原始PXI规范提供的10 MHz背板时钟，以及单端PXI触发

总线 and 长度匹配的PXI星形触发信号。PXI Express还在背板上增加了100 MHz差分时钟和差分星形触发器，以提供更高的抗噪能力和行业领先的同步精度(分别为250 ps和500 ps的模块间延迟差)。NI定时和同步模块旨在充分利用PXI和PXI Express机箱中的高级定时和触发技术。

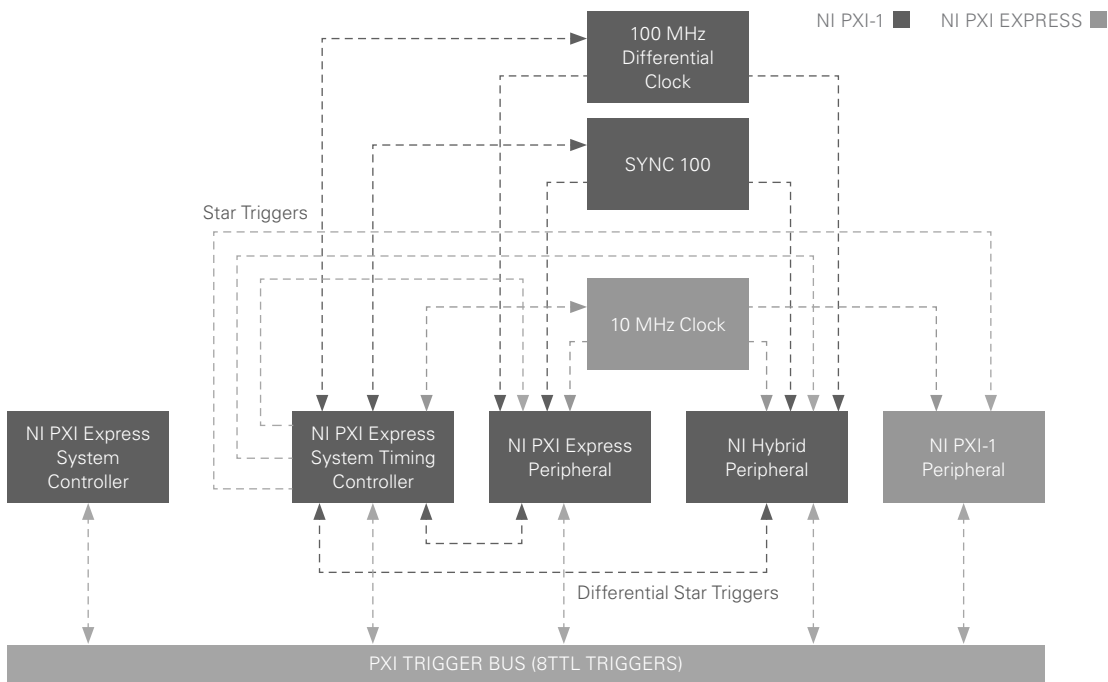


图 8 | PXI机箱定时和同步特性示例

附加信息

阅读“仪器基础知识”系列白皮书,了解更多关于使用测试和测量仪器的基础知识。该系列白皮书涵盖从模拟采样理论到接地考虑因素等主题,旨在提高测量质量。