

PCI Express 标准概述

本技术白皮书将回顾被成功广泛采用的 PCI 总线，同时详细介绍下一代高性能 I/O 互连技术——PCI Express 它作为标准的局域 I/O 总线并广泛应用于未来各种计算机平台。本白皮书还将就 PC 总线技术的演变历程、PCI Express 的物理层和软件层、PCI Express 所能带来的益处和竞争优势以及此项崭新技术在测量自动化系统领域里预示的令人振奋的深远意义，做个整体技术性概述。

目录

- 概述
- PC 的演进历史
- PCI 总线历史和概述
- PCI 面临的挑战
- PCI Express 构架
- PC 构架的现状和未来
- PCI Express 封装
- PCI Express 的优势
- 术语表

概述

本白皮书主要着眼已经得到广泛采用的 PCI 总线的成功优势所在，同时详细介绍下一代高性能 I/O 互连技术——PCI Express——它作为标准的局域 I/O 总线被广泛应用于未来各种计算机平台。本白皮书还将就 PC 总线技术的演变历程、PCI Express 的物理层和软件层、PCI Express 所能带来的益处和竞争优势以及此项崭新技术在测量自动化系统领域里预示的令人振奋的深远意义，做个整体技术性概述。

PC 的演进历史

上世纪 90 年代初，PCI 总线一经推出，即统一了当时并存的多种 I/O 总线，诸如 VESA 局域总线，

EISA，ISA 和微通道等等，如图 1 所示。它首先被用于实现芯片与芯片间互连并替代了不全面的 ISA 总线。在早期，33MHz PCI 总线很好地满足了当时主流外设 I/O 的带宽需要。然而现在情况发生了变化，处理器速度惊人地提高，以及处理器和内存的频率也不断地攀升。在这一期间，PCI 总线的频率由 33MHz 提高到 66MHz，而处理器的速度由 33MHz 提高到 3GHz。一个具有新 I/O 技术的总线设备如千兆以太网和 IEEE 1394B，就可能占用几乎所有 PCI 总线带宽。

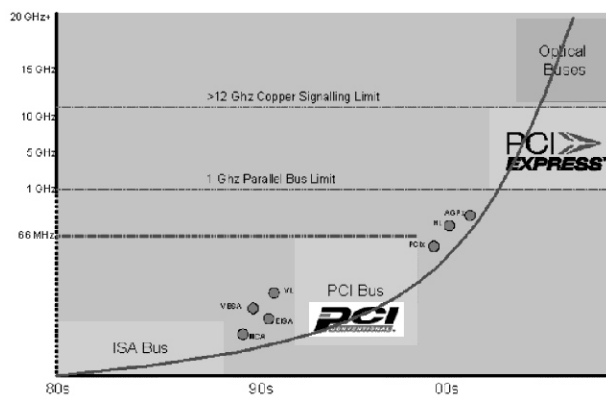


图1 PC 总线的发展历程

PCI 总线历史和概述

和以前的总线相比，PCI 总线具有很多优势，其中最重要的是处理器的独立性，带缓冲的隔离，总线主控和真正的即插即用。带缓冲的隔离真正地实现了 CPU 局域总线和 PCI 总线间在电路和时钟方面的隔离。这一特性能为系统性能带来两个主要好处。首先是 PCI 总线和 CPU 总线可以工作在各自的时钟周期；第二是由于有独立的 PCI 总线速度和负载，可单独提高 CPU 局域总线的频率。通过总线主控，PCI 设备以仲裁处理方式访问 PCI 总线并且能直接控制总线处理业务，而不用等主 CPU 为设备提供服务，从而使得整个 I/O 处理业务的等待时间减少。即插即用操作，可以自动检测和配置

设备，得到基本地址不再需要中断运行和手工设置开关跳线，而这些都曾使 ISA 板卡的用户感到很棘手。

PCI 面临的挑战

出色的 PCI 已经享受到了成功的殊荣，而今开始面临一系列新的挑战，包括带宽的限制，主管脚数的限制，缺乏如同步数据传输这样的实时数据传输服务以及没有下一代 I/O 所需的服务质量，以及电源管理和虚拟 I/O 等问题。

自从 PCI 推出以来，我们不断完善 PCI 的各项规格，试图跟上日益增加的更高 I/O 要求。各阶段具体革新总结如下表所示：

PCI 总线带宽 (MHz)	总线时钟频率 (MHz)	带宽 (M 字节/s)	所针对市场
32	33	132	桌面/移动
32	66	264	服务器
64	33	264	服务器
64	66	512	服务器

表1 PCI 带宽和目标市场对象

对于 PCI 和由其衍生的总线来说，协议开销和总线拓扑结构导致可使用的总线带宽要小于理论带宽。总线上的设备要共享可用带宽，这是 PCI 主要的局限性。由于 PCI 的时钟频率已不能满足某些应用的要求，由其衍生出来的其它一些总线，如 PCI-X 和高级图像端口 (AGP)，则通过提高总线频率来缓解带宽的压力。增加频率的副作用是总线连通距离和总线收发器可驱动连接器的数量也会相应缩短和减少，这样就导致了 PCI 总线的分割。每个片断都需要一个完整的 PCI-X 总线来连通主驱动芯片和所有功能插槽。例如，每一部分 64 位的 PCI-X 需要 150 个管脚。很显然，要实现这样的连线，板层数和芯片封装引脚都会有很大的难度并且成本非常昂贵。这种额外的成本只有在对带宽有严格要求的情况下才有价值，如服务器。

诸如数据采集，波形生成，包含音频和视频流的多媒体应用等需要保证带宽和有确定的等待时间，如果不

能满足这一点，有经验的用户也会束手无措。原始的 PCI 规范并没有考虑这些问题，这是因为在制定规范时上述应用并不普及。如今的同步数据传输，如高清晰度的无压缩视频和音频，要求 I/O 系统包含同步传输功能。同步传输的另一个作用是：和典型的 PCI 设备相比，局域 PCI Express 设备只用少得多的内存就能实现缓冲功能，从而把所使用的可变带宽降至最低。

最后，对下一代 I/O 的要求如服务质量测量和电源管理等，能提高数据的完整性并允许有选择地关闭系统设备对于现代 PC 不断增加的电源功率来说这是需要重点考虑的。虚拟通道允许数据通过虚拟路由来传送；即使其它通道被更重要的处理业务所阻塞，也一样能进行数据传输。

尽管 PCI 总线在某些方面已有些过时，但是转变到 PCI Express 还要经过一个长期过程，并且未来许多年里 PCI 总线将仍然是 I/O 扩展的强有力竞争者。随着 PCI Express 技术日益赢得认可和广泛采用，2004 年以及此后推出的新型 PC 将会同时配有 PCI 插槽和 PCI Express 插槽。

PCI Express 构架

如图 2 所示，即 PCI Express 的层次体系结构。它保持了与 PCI 寻址模式（加载 - 存储体系结构且具有单层地址空间）的兼容性，从而保证了所有现有的应用程序和驱动操作无需改变。PCI Express 配置使用的是 PCI 即插即用标准中所定义的标准机制。软件层发出读

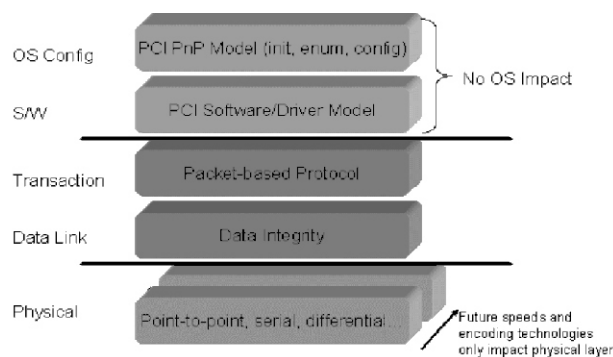


图2 PCI Express 层次体系结构

和写请求，并使用基于数据包、分段传输的协议通过处理层传输至 I/O 设备。链路层向这些数据包添加序列号和循环冗余校验（CRC）从而创建了一个高度可靠的数据传输机制。基本的物理层包括两个单工通道，即传输对和接收对。这个传输对和接收对一起被称为一个信道。2.5 Gb/s 的初始速度提供了在每个 PCI Express 信道上每个方向上大约 250 MB/s 标准带宽。一旦考虑协议头，这其中大约 200 MB/s 由设备用来传输数据。这一速率是大多数典型 PCI 设备的 2 番到 4 番。而且不同于 PCI 的是，只要总线带宽在设备之间共享，每一个设备都具有此带宽。

物理层

基本的 PCI Express 链路包括两个低电压的 AC 耦合差分信号对（一个传输对和一个接收对），如图3所示。物理链路层信号使用一个去加重（de-emphasis）策略来减少符号间干扰，从而提高了数据完整性。数据时钟通过使用 8b/10b 的解码策略来嵌入，从而到达极高的数据传输率。初始的信号发生频率是每个方向 2.5 Gb/s（生成1个信号）而且它将会随着硅工艺的提高而增加至每个方向 10 Gb/s（信号在铜线中传输可能实现的最大速率）。两个链路层的 PCI Express 代理在物理层上传输数据包。

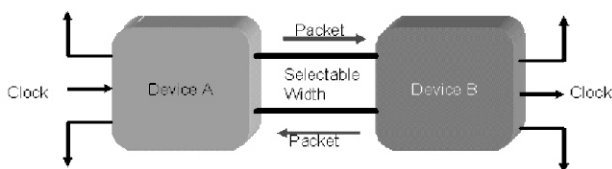


图3 PCI Express 物理连接图

一个 PCI Express 链路层的带宽可能通过增加信号对形成多个信道而线性增长。物理层提供 x1, x2, x4, x8, x12, x16 和 x32 信道宽度，理论上它将输入的数据包在这些信道上分配。使用 8b/10b 编码方式，每一个字节在这些信道上传输。数据的分拆和整合对于其他层来说是透明的。在初始化阶段，每个 PCI Express 链路通过链路两端代理的信道宽度的匹配和频率操作来建立。在这其中没有固件和操作系统软件的参与。PCI Express 体系结构提供了将来通过速度升级和高级编码技术所带来

的性能提升。将来的速度、编码技术或者媒介仅仅会影响物理层。

在 PCI Express 中使用不同的信道宽度需要用户注意扩展板要求的带宽以及与母板提供的带宽相匹配。除了图形卡以外（通常是 X16），许多早期的 PCI Express 扩展板使用的 X1 的宽度。随着更高的带宽要求，越来越多的板卡将使用更宽的带宽。早期的 PCI Express 计算机提供一个 X16 的连接器和一些 X1、X4、X8 插槽的组合，这由计算机面向的客户所决定。PCI Express 允许在不匹配的信道宽度上进行一些交互操作，这取决于不匹配的方向。在一个较小宽度的连接器上使用更大宽度的扩展板卡是向下插入。例如，利用 PCI，您可以在一个 32 位的插槽上插入一个 64 位的 PCI 板卡。然而，在 PCI Express 中，向下插入在物理上被扩展板卡和连接器所阻止。另一中不匹配在一个较大的连接器上使用一个较小的扩展板卡是向上插入。向上插入是允许的，但是会受到限制在这种配置下，母板厂商需要支持仅在 X1 数据率上的扩展板卡，从而浪费了具有更快接口速率的扩展板卡上的投资。无论一个特定的母板在向上插入配置时能否在全速率时处理一个扩展板卡，都必须在每种情况下向母板生产商确认。例如，一些母板可以在一个 X4 的扩展板卡插入一个 X8 或 X1 的插槽时，以全速率（X4）进行处理，然而来自同一厂商的其他母板可能仅以 X1 的速率运行。在一个母板既带有集成图形控制器（板载）又带有一个 X16 的 PCI Express 插槽以用于将来图形扩展的情况下，通常不可能在板载图形卡使用能的同时使用那个 X16 的插槽。

数据链路层

链路层的主要作用就是保证数据包在 PCI Express 链路路上的可靠传输。链路层负责数据完整性并向处理层的数据包添加序列号和循环冗余校验，如图4所示。大部分数据包在处理层初始化。一个基于优先数的、流量控制的协议保证了数据包仅在另一端具有接收这个数据包的缓冲区情况下才能传输，这样就去除了任何数据包的请求以及由于资源限制而引起的总线带宽浪费。链路

层会自动的重新收发一个被标记为损坏的数据包。

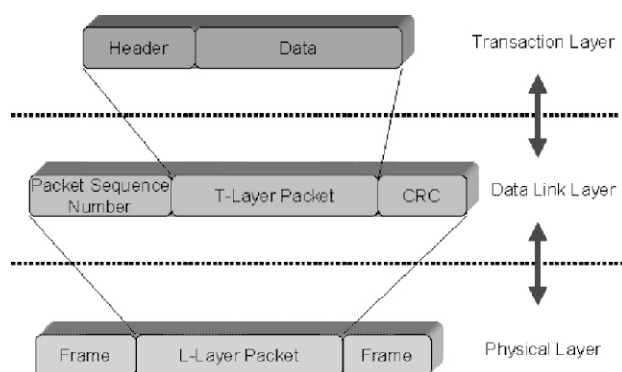


图4 数据链路层增加了数据完整性

处理层

处理层接收软件层的读和写请求，并创建请求数据包发送至链路层。所有的请求都被分段的处理而且一些请求包需要一个响应包。处理层也从链路层接收响应数据包并且将它与原先的软件请求相匹配。每一个数据包都具有一个唯一的标识，使得响应包能够指向正确的源。数据包的格式提供了 32 位的存储地址和扩展的 64 位地址。数据包也具有诸如“无侦听”、“灵活排序”“优先级”等属性，这可能用于将这些数据包在 I/O 子系统中以最优的路径传输。

处理层提供 4 个地址空间 3 个 PCI 地址空间（内存、I/O 和配置）和消息空间。PCI 2.2 引入了另一种广播系统中断的方式称为消息信号中断（MSI）。作为 PCI 2.2 系统中一种可选的性能，这里使用了一种特殊格式的内存写处理替代硬连接的边带信号。PCI Express 技术指标重新使用了 MSI 概念以作为一种主要的中断处理方式，并且使用了消息空间来接收所有的优先的边带信号来作为带内信号，例如中断、电源管理请求，和复位。其它 PCI 2.2 技术指标中的“特殊周期”，例如中断确认，也被处理成带内消息。您可以将 PCI Express 消息视为“虚拟的线”，因为他们的作用是消除当前平台上所使用的各种边带信号。

软件层

软件兼容性对于 PCI Express 是极为重要的。软件

兼容性有两个方面初始化（或者列举）和运行时刻。PCI 具有一个功能强大的初始化模式，其中操作系统可以发现所有当前添加的硬件设备然后分配系统资源，例如内存、I/O 空间和中断，从而创建一个优化的系统环境。PCI 配置空间和 I/O 设备可编程能力是 PCI Express 体系结构中保持不变的重要概念。PCI 所使用的运行时刻软件模式是一个加载 - 存储、共享内存的模式，它在 PCI Express 体系结构中得以保持以使得所有现有的软件能够无需改变即可执行。新的软件也可以利用一些 PCI Express 最新的先进特性，例如高级开关（本文并未提及）。

PC 体系构架的现在和将来

具有 PCI 的 PC 体系结构，2002 年的 PC 体系结构包括许多不同的要求以满足每一种互连方式。例如，图形卡通过高级图形接口（AGP）接入，内存桥通过许多接口与 I/O 桥连接，例如图 5 所示的 HubLink。

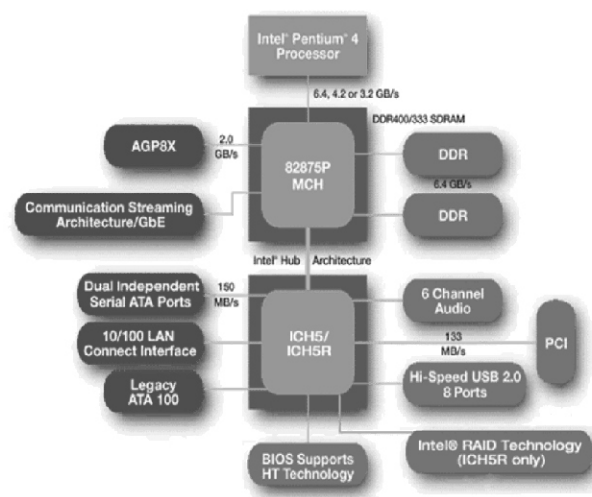


图5 具有PCI的PC体系结构，2002年（Intel许可）

配备 PCI Express 的 PC 构架

如图 6 所示，PCI Express 采用通用的总线构架实现了 I/O 系统一体化（集成）。此外，PCI Express 也取代了某些连接子系统的内部总线。

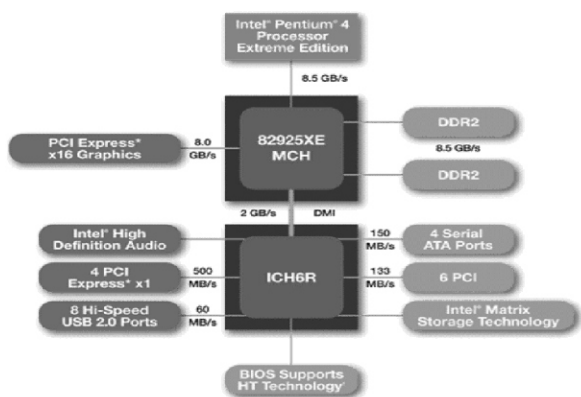


图6 具有 PCI Express 的 PC 体系结构 (Intel 许可)

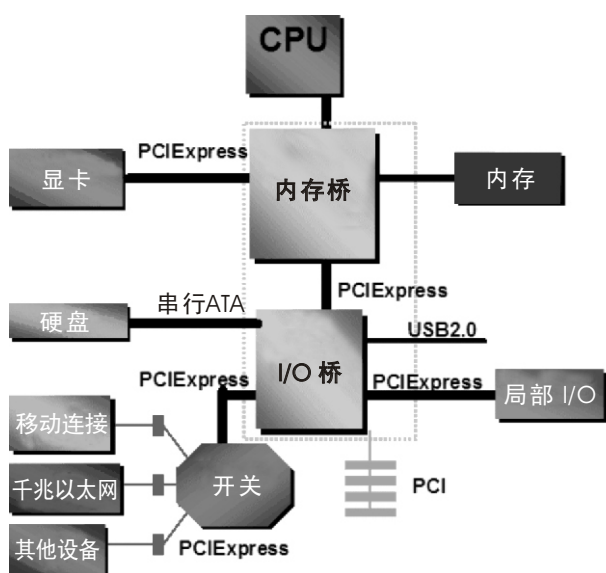


图7 某主板上的 PCI Express 扩展插槽

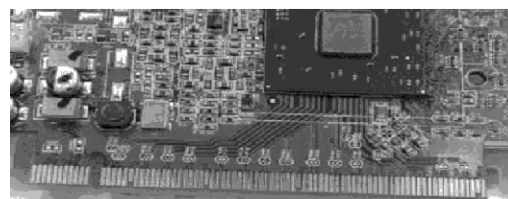


图8 具有 X16 接口的显卡

PCI Express 封装

根据所应用的不同平台，诸如笔记本，台式机和服务器，PCI Express 可有多种不同的 I/O 扩展形式。需要更高的带宽来满足 I/O 需要的服务器，就能拥有数量更多的 PCI Express 插槽，这些插槽能提供更多的 PCI Express 通路。相反，笔记本内部采用 PCI Express 构架，只提供用于中速外设的单一 X1 通路。

台式机 PCI Express 扩展插槽

台式机和 workstation 上的替代 PCI Express 板卡和现在的 PCI 板卡具有非常相似的机械结构，都有板端接头和固定支架，接头穿过支架和主要 PWB (印刷电路) 相

连。主板上的插槽增强了固定性，确保板卡在振动和运输的情况下不会脱落。根据不同的 PCI Express 通道宽度，板端接头有不同的尺寸，从 X1 到 X16。计划使用 X16 的板卡来代替主板的 AGP 插槽，用于显卡扩展。图7 显示了带有三个 PCI 插槽 (两个 x1 和一个用于显卡的 x16) 的主板，注意到该主板还保留了一定数量的传统 PCI 插槽，而且传统 PCI 插槽还将存在相当长的时间。图8显示了典型的具有 X16 连接的显卡，其最快的数据流量为 3.2G 字节 /s。图9显示了不同 PCI Express 接口的机械图。

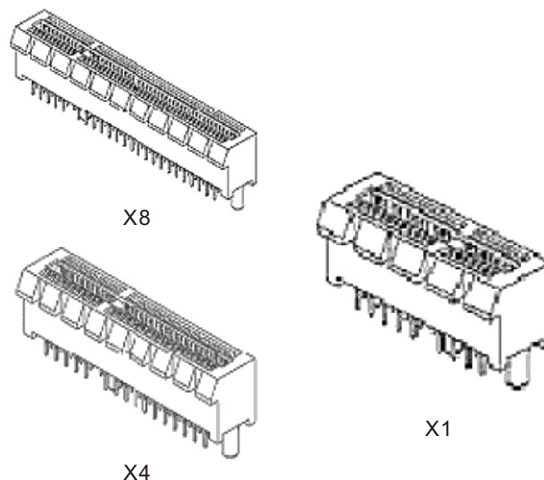


图9 不同 PCI Express 的机械图

ExpressCard

ExpressCard 标准为用户在系统中添加硬件或媒介提供了非常简便的方法。ExpressCard 模块主要针对只需有限扩展的笔记本电脑和小型 PC。您无需借用工具，也能随时安装或拆除 ExpressCard 模块（不像传统的台式机接卡那样麻烦）。ExpressCard 技术为台式机和移动计算机用户提供了一种统一连贯，简便快捷，可靠且无风险的方案，用于将各种设备接入自己的现有的系统。

ExpressCard 技术凭借两种可升级的高速串行接口 PCI Express 和 USB2.0 取代了传统的 I/O 设备并行总线。ExpressCard 开发人员使用 PCI Express 建立的模块具有最高的应用性能，或者能充分利用已有的各种 USB 硅芯片。无论模块供应商选择何种总线技术，最终用户的使用效果都是一样的，最终用户从外部是看不出模块采用的是何种总线的。

有两种标准格式的 ExpressCard 模块 ExpressCard/34 (34 mm宽) 和 ExpressCard/54(54 mm宽)。两种模块和 II 型 PC 卡一样都为 5mm 厚。标准模块的长度为 75mm，比标准的 PC 卡要短 10.6mm。ExpressCard/34 和 ExpressCard/54 模块使用同样的接口。

ExpressCard 模块的两种尺寸为系统制造商提供一定的灵活性和选择余地，而在之前的模块尺寸标准下他们是没有这样灵活的选择余地的。ExpressCard/34 设备适合较小系统，而对于物理上不适合采用较窄的 ExpressCard/34 格式的设备，可使用较宽的 ExpressCard/54 模块。图10 比较了两种 ExpressCard 模块和 PCMCIA Cardbus 模块的尺寸。较大的 54mm 模块应用包括 SmartCard，Compact Flash 读写器和 1.8in 硬盘。ExpressCard/54 除了为器件提供更多的空间，还比较窄的 ExpressCard /34 模块有更好的散热性。这一特性使得 ExpressCard/54 先天具有更高的性能，并选择用于第一代应用的。然而，如果制造商把应用装入较小的模块，这些模块则能在两种

ExpressCard 插槽里工作。出于提高易用性的目的，特别设计的 ExpressCard/54 插槽能轻松地导入较窄的 ExpressCard/34。另外值得一提的是，这样尺寸设计可以使 CardBus 卡插入 ExpressCard 插槽，或者 ExpressCard 插入 CardBus 插槽，而且对任何部件都不会造成损伤。

每个 ExpressCard 主接口都必须包括单条 PCI Express 通路 (X1)，它单方向基准数据速率为 2.5Gb/s，这由 PCI Express 基本规范 1.a 所定义。ExpressCard 主接口也必须能接收 USB2.0 定义的低速，全速和高速 USB 数据。作为兼容 ExpressCard 的主机平台这两种接口都必须能提供。一个 ExpressCard 模块可根据应用需要使用两种或其中一种标准接口。

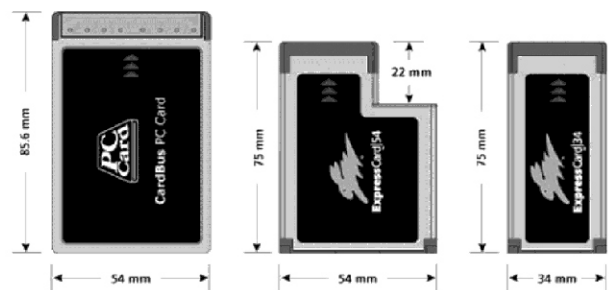


图10 ExpressCard和PCMCIA/CardBus机械格式比较

服务器 I/O 模块

服务器要求 I/O 接口卡封装具有的特性包括：封闭机箱接口卡的拆除/安装，完全地热插拔，接口卡的 ESD 保护和故障处理，接口和特性的标准化管理，充分的冷却，独立的大电源和服务器内简化的 I/O 管脚。

SIOM 规格中确定了 I/O 接口卡的两种 PCI Express 模块化封装，它也被定义成为服务器 I/O 模块或 SIOM。这些模块化接口卡被设计成可在封闭机箱内安装和拆除。经过设计，它们本身具有热插拔功能，这意味着在机箱供电时可以安装或插拔模块而不会损伤模块或机箱。这两种格式具有相同高度和厚度，只是在宽度和需要的机箱空间上有所不同。单宽度模块可适用于所有 SIOM 插槽。双宽度模块则需要占用两个相邻的

SIOM 插槽。

单宽度模块可达到 X8 PCI Express 连接；双宽度模块能提供高达 X16 速的连接。（在 PCI Express SIOM 服务器中可选用双宽度插槽）。模块标准接口中的最小管理界面包含可提供有关主机系统接口卡管理数据的 EEPROM。可选的内部存储接口能连接最多四个 1X 的 SAS/SATA 端口和一个控制硬盘 LED 的边频带接口。

SIOM 和 SIOM 机箱都需要进行冷却。根据规格中的定义，SIOM 机箱要为每个插槽提供的最小送风量。SIOM 所要求的最小和最大送风量确保 SIOM 有一定的 I/O 的冷却气流规定，并且 I/O 的热负荷不会加到机箱上。

PCI Express 的优势

对于基于 PC 的测量和自动化系统，多年来一直选择 PCI 总线作为插入式扩展卡总线。在未来它还将继续扮演重要角色。然而，随着 PC 的发展，PCI 总线（和它的并行构架）已不能跟上平台其它部分的发展。PCI Express 解决了这些问题并在以下 5 个方面带来了很大益处：

- 高性能 —— 特别是在带宽方面，X1 链路时带宽超过 PCI 的两倍，并且随着通路的增加带宽也线性增宽。另一个不十分明显的好处是这样的带宽可同时存在于每个链路的双方向。此外，初始信号 2.5Gb/s 的速度有望被提高，从而可以进一步加快传输速度。

- 简化 I/O —— 简化芯片到芯片和内部用户之间过多的总线访问，如 AGP，PCI-X 和 Hublink。这一特性降低设计的复杂性和系统实现的成本。

- 层次式构架 —— PCI 所建立的构架能在保护软件投资的同时采用新技术。层次式构架带来的两方面好处是提高信号速率的物理层和软件兼容性。

- 下一代 I/O —— 通过同步数据传输，PCI Express

能为数据采集和多媒体应用提供新的功能。同步传输能提高服务质量（QoS）保证，从而确保数据以确定性和依赖时间的方式及时地传送。

- 易用性 —— PCI Express 能极大地简化用户对系统进行添加和升级。PCI Express 支持热交换和热插拔。由于热插拔依赖于特定的操作系统特性，可能会延缓硬件的推出。此外 PCI Express 设备的各种形式，特别是 SIOM 和 ExpressCard，将为服务器和笔记本电脑提供高性能的外设。

所有这些特性确保 PC 将发展成为下一代测量和自动化系统最具吸引力的平台。

术语表

8B/10B 编码 —— 一种嵌入式时钟编码信号。编码有两个目的，首先它确保了数据流中有足够的变换用于恢复时钟，第二 0 和 1 的个数是匹配的，保证了 AC 耦合系统中 DC 平衡

AGP —— 高级图形端口使用不同接口卡的更高速 PCI 总线，是为了满足台式机专用插入式显卡的带宽需要而开发的。

CRC —— 循环冗余码校验通过在包中添加一组计算值来检测和纠正比特误差的方法。这些值由包中原始数据推出

差分 —— 差分信号采用两条线来传送一个 180 度异相信号。主要的好处是能降低引入噪声的灵敏度

ExpressCard —— 包括 PCI Express 和 USB2.0 接口的小型 I/O 卡

ISA Bus —— 工业标准构架 1984 年推出的 PC 总线标准，它把 XT 总线构架扩展到 16 位。设计用来连接外设卡和主板。也被称为 AT bus

PICMG —— PCI 工业计算机制造商联盟维护目前

CompatPCI 和 PCI/ISA 规范的公司联盟

PCI 外设组件连接 —— 最初由 Intel 设计的高速并行总线，用来连接外设和 CPU

PCI Express PCI 的改进版，保持 PCI 软件的使用模型并使用具有多通路的高速（2.5Gb/s）串行总线替代物理总线

SIOM 服务 I/O 模块 —— I/O 模块，为服务器和 workstation 应用而设计，使用 PCI Express 进行通信

USB2.0 是外部差分点对点串行总线，能提供的数据速率为 480Mb/s。USB2.0 是 USB1.1 的扩展，它使用相同的线缆和连接器