

第 1 章 网络化分布式测试系统的形成

1.1 传统集成式测试系统简介

传统的集成式测试系统主要是基于 GPIB、VXI 和 PXI 总线的测试系统。各总线特性介绍如下。

1.1.1 GPIB 测试

GPIB (General Purpose Interface Bus) 是一种并行的与仪器相连接的小型标准接口系统。1972 年美国 HP (惠普) 公司推出了 GPIB。1975 年 4 月美国电气及电子工程师协会颁布了 IEEE 488—1975。1977 年 10 月表决通过后 IEC (国际电工委员会) 便颁布了 IEC625 标准。1987 年 IEEE 又将原 IEEE—488 标准进行了个别修订并定名为 IEEE—488.1—1987, 并同时颁布了 IEEE—488.2—1987 标准, 对器件消息的编码格式做了进一步的标准。这些标准包括 HP—IB、IEC—IB、IEC—625、IEEE 488.1 GPIB (General Purpose Interface Bus) SJ 2479 及电子工业部的部标准 GBN 249 (国家标准)。机械接口安装在计算机或程控仪器的后面板上, 通过无源标准电缆连接, 可以组成不超过 15 台仪器的小型台式自动测试系统。

GPIB 母线结构如图 1.1 所示, 通过无源的标准电缆把各程控仪器连在一起, 各对应引脚是并行结构, 仪器之间可以不经计算机而直接通信。

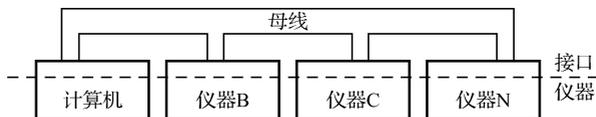


图 1.1 GPIB 母线结构

GPIB 器件配置了 488.1 接口的独立装置。按器件在系统运行功能不同分为 3 类:

- 控者器件: 系统的控制者, 能发布各种接口命令、对接口系统进行管理, 一般采用计算机。
- 讲者器件: 当控者退出控制后, 能发布测量数据、报告内部状态或发布程控命令的器件。
- 听者器件: 能接收控者发给指定器件的命令或接收讲者发出的数据和程控命令的器件。

GPIB 消息: 标准接口中通信的内容称为消息。按内容分为接口消息和器件消息。接口消息: 由控者发出的消息。器件消息: 由讲者发出的消息, 按传递途径分为远地消息和本地消息。远地消息: 由器件接口外部通过标准电缆传递的消息。本地消息: 产生于器件内部而且不通过标准电缆向外传递的消息。

GPIB 接口, 初级接口: 用于管理接口本身、控制数据接收或发送或改变接口内部功能状态。标准规定了 10 种接口功能, 器件可以从中选择一部分。次级接口: 与器件功能密切相关的接口电路, 如器件对从初级接口中接收的程控命令译码电路。初级接口设计标准化, 次级接口设计由设计者自行决定。接口功能区: 设计必须符合 GPIB 的规定, 实现器件间的匹配连接 (机械、电气、功能, 运行) 用以管理和控制器件消息的传递, 处理接口消息 (Interface Messages) 并据之改变状态的消息。远地接口消息: 经由 GPIB 总线传递。本地接口消息: 在器件功能与接口功能之间传递。器件功能区: 完成器件所担负的测控功能。产生器件消息 (Device Dependent Message) 通过接口编码送上 Bus, 同时

也接收由接口译码的其他器件发出的器件消息。

在一个自动测试系统中，GPIB 仪器组建系统如图 1.2 所示，一般需要一台计算机，除计算机之外，最多还能容纳 14 台仪器。数传距离指数据在器件之间的传递距离，若用母线电缆将器件一个接一个按顺序连接，数据在第一个器件与最后一个器件的传递距离恰好等于母线电缆总长，此长度不能超过 20m。标准电缆一般为 250~500KB/s。特殊情况下，采用 HP-1000L，电缆总长小于 10m，发送门采用三态门，数传速度最高可达 1MB/s。自动测试系统中实际的数传速度还与器件特性密切相关，像打印机绘图仪之类的低速仪器会使数传速度降到很低。



图 1.2 计算机程控 GPIB 仪器

1.1.2 VXI 测试

VXI (VME bus Extension for Instrumentation) 是 VME 总线在仪器领域的扩展。总线从 GPIB 到 VXI 转化的目的是：仪器模块（见图 1.3）以明确的方式通信；系统的体积小；具有高的数据吞吐量；对测试环境的适应能力强，适于环境的要求——可靠性、抗干扰性（EMI）、机内温升（10C，冷却）、电源功率等；开放式系统结构，系统组建及扩展方便；系统资源共享；控制灵活，方便。VXI 总线先后出现了几个版本，即 1987 年 VXI bus Rev1.0, 1988 年 VXI bus Rev1.2, 1989 年 VXI bus Rev1.3, 1992 年 VXI bus Rev1.4, 1992 年 9 月 17 日正式批准为 IEEE-1155-1992 标准。

VXI 仪器模块严格的尺寸标准为：A/B/C/D。其中，VME：A/B；尺寸配合，叠装；严格的屏蔽（EMC）、冷却（通风）、电源（功率，纹波）的要求，有严格的测试标准；插头：32X3，P1/P2/P3；A：P1；B：P1/P2（计算机模块）；C：P1/P2（仪器模块）；D：P1/P2/P3（高档仪器模块）；使用：A：0.2%；B：8.2%；C：85.3%；D：6.3%。主机箱严格的尺寸：B（20 个插槽）/C/D（13 个插槽），用得最多的是 C 尺寸机箱；严格的屏蔽（EMC）、冷却（通风）、电源（功率，纹波）的要求，有严格的测试标准；背板总线：严格的设计要求（传输速率高），8~12 层印刷板。



图 1.3 VXI 总线仪器模块实物

1. VXI 系统器件

根据 VXI 总线器件所支持的通信协议的能力可分为 4 类。

(1) 消息基器件

以消息通信为基础的模块。消息基器件是 VXI 系统中的智能器件，具有 CPU 功能及语言处理能力、自动组态及中断能力、资源管理功能以及很强的通信能力（器件特定通信协议、共享存储器通信协议、ASCII 字串行通信协议）。消息基器件是 VXI 系统中最复杂的器件，通常用于：内嵌式计算机、智能接口（GPIB-VXI 接口、MXI 接口、1553 航空总线接口、1394 高速串行总线接口等）、智能仪器

(频谱分析仪、开关控制器等)。

(2) 寄存器基器件

以寄存器通信为基础的仪器模块。寄存器基器件是以仪器模块中寄存器的读/写来实现通信的器件,它只具有二进制数据的通信能力(器件特定通信协议),也可以利用中断。

寄存器基器件是 VXI 系统中最简单的器件,一般仪器常用,如 DDM、计数器、函数发生器、矩阵开关等。

(3) 存储器器件

以共享存储器通信协议为基础的存储器模块。存储器器件实际就是 ROM/RAM,但它以存储器读/写操作来实现数据通信,并为 VXI 系统中的消息基器件所共用。

(4) 扩展器件

扩展器件是为将来应用所定义的新一类 VXI 总线器件,包括扩展寄存器基器件、扩展存储器器件。

2. VXI 模块通信规程

为了保证数据的可靠传输, VXI 总线系统采用了分层通信规约(协议)的方法支持系统结构。

VXI 通信协议包括:二进制通信协议(器件特定通信协议)——寄存器基器件; ASCII 字符串通信协议(数十条命令)——消息基器件;共享存储器通信协议(地址,数据的格式和排序,数据结构)——共享存储器器件。

3. VXI 仪器驱动器

VXIplug & play(简称 Vpp)是 VXI 仪器驱动程序规范。该规范使得 VXI 即插即用,其目标是插入 VXI 仪器模块后,10 分钟内即可在计算机上控制仪器的功能面板,并立即应用。仪器驱动器就是处理与一特定仪器进行控制和通信的一种软件,是 VXI 总线系统软件的重要组成部分。它大大简化了系统集成者的工作。

为保证 VXI 的开放性及即插即用的要求, VXI 联盟制定了仪器驱动器的标准,并由模块生产厂提供。仪器驱动器由 5 部分组成:功能体、操作接口、编程接口、I/O 接口、子程序接口。

1.1.3 PXI 测试

自 1986 年美国国家仪器公司(NI, National Instruments Corp)推出虚拟仪器(VI, Virtual Instruments)的概念以来, VI 这种计算机操纵的模块化仪器系统在世界范围内得到了广泛的认同与应用。在 VI 系统中,用灵活、强大的计算机软件代替传统仪器的某些硬件,用人的智力资源代替许多物质资源,特别是系统中应用计算机直接参与测试信号的产生和测量特征的解析,使仪器中的一些硬件、甚至整件仪器从系统中“消失”,而由计算机的软硬件资源来完成它们的功能。但是,在 GPIB、PC-DAQ 和 VXI 这 3 种 VI 体系结构中, GPIB 实质上是通过计算机对传统仪器功能进行扩展与延伸; PC-DAQ 直接利用了标准的工业计算机总线,没有仪器所需要的总线性能;而第一次构建 VXI 系统尚需较大的投资强度。

1997 年 9 月 1 日, NI 发布了一种全新的开放性、模块化仪器总线规范——PXI。PXI 是 PCI 在仪器领域的扩展(PCI eXtensions for Instrumentation),它将 CompactPCI 规范定义的 PCI 总线技术发展成适合于试验、测量与数据采集场合应用的机械、电气和软件规范,从而形成了新的虚拟仪器体系结构。制定 PXI 规范的目的是为了将台式 PC 的性能价格比优势与 PCI 总线面向仪器领域的必要扩展完美地结合起来,形成一种主流的虚拟仪器测试平台。

PXI 这种新型模块化仪器系统是在 PCI 总线内核技术上增加了成熟的技术规范和要求形成的。它

通过增加用于多板同步的触发总线和参考时钟、用于进行精确定时的星形触发总线以及用于相邻模块间高速通信的局部总线来满足试验和测量用户的要求。PXI 规范在 CompactPCI 机械规范中增加了环境测试和主动冷却要求以保证多厂商产品的互操作性和系统的易集成性。PXI 将 Microsoft Windows NT 和 Microsoft Windows 95 定义为其标准软件框架,并要求所有的仪器模块都必须带有按 VISA 规范编写的 WIN32 设备驱动程序,使 PXI 成为一种系统级规范,保证系统的易于集成与使用,从而进一步降低最终用户的开发费用。

1. PXI 机械规范及其特性

由 CompactPCI 规范引入的 Eurocard 坚固封装形式和高性能的 IEC 连接器被应用于 PXI 所定义的机械规范,使 PXI 系统更适于在工业环境下使用,而且也易于进行系统集成。

PXI 提供了两条与 CompactPCI 标准兼容的途径。

(1) 高性能 IEC 连接器

PXI 应用了与 CompactPCI 相同的、一直被用在像远距离通信等高性能领域的高级针-座连接器系统。这种由 IEC-1076 标准定义的高密度(2mm 间距)阻抗匹配连接器可以在各种条件下提供尽可能好的电气性能。

(2) Eurocard 机械封装与模块尺寸

PXI 和 CompactPCI 的结构形状完全采用了 ANSI 310—C、IEC—297 和 IEEE 1101.1 等在工业环境下具有很长应用历史的 Eurocard 规范。这些规范支持小尺寸(3U=100mm×160mm)和大尺寸(6U=233.35mm×160mm)两种结构尺寸。IEEE 1101.10 和 IEEE 1101.11 等最新的 Eurocard 规范中所增加的电磁兼容性(EMC)、用户可定义的关键机械要素以及其他有关封装的条款均被移植到 PXI 规范中。这些电子封装标准所定义的坚固而紧凑的系统特性使 PXI 产品可以安装在堆叠式标准机柜上,并保证在恶劣工业环境中应用时的可靠性。

PXI 仪器模块有两种主要结构尺寸及其接口连接器。其中, J1 连接器上定义了标准的 32-bit PCI 总线,所有的 PXI 总线性能定义在 J2 连接器上。PXI 机箱背板上包括可连接 J1 和 J2 连接器的所有 PXI 性能总线,对仪器模块来讲,这些总线可以有选择地使用。

图 1.4 用于说明一个完整 PXI 系统的基本组成部分。PXI 规定系统槽(相当于 VXI 的零槽)位于总线的最左端,而 CompactPCI 系统槽则可位于背板总线的任何地方。PXI 规范定义唯一确定的系统槽位置是为了简化系统集成,并增加来自不同厂商的机箱与主控机之间的互操作性。PXI 还规定主控机只能向左扩展其自身的扩展槽,不能向右扩展而占用仪器模块插槽。

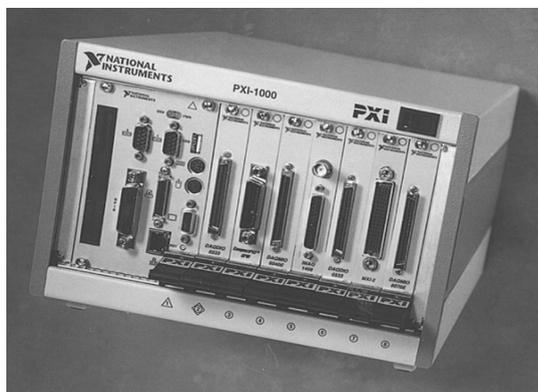


图 1.4 PXI 系统实物照片

(3) 电气封装规范

除了将 CompactPCI 规范中的所有机械规范直接移植进 PXI 规范之外，为了简化系统集成，PXI 还增加了一些 CompactPCI 所没有的要求。如前所述，PXI 机箱中的系统槽必须位于最左端，而且主控机只能向左扩展以避免占用仪器模块插槽。PXI 还规定模块所要求的强制冷却气流必须由模块底部向顶部流动。PXI 规范建议的环境测试包括对所有模块进行温度、湿度、振动和冲击试验，并以书面形式提供试验结果。同时，PXI 规范还规定了所有模块的工作和存储温度范围。

(4) 与 CompactPCI 的互操作性

PXI 的重要特性之一是维护了与标准 CompactPCI 产品的互操作性。但许多 PXI 兼容系统所需要的组件也许并不需要完整的 PXI 总线特征。例如，用户或许要在 PXI 机箱中使用一个标准 CompactPCI 网络接口模块，或者要在标准 CompactPCI 机箱中使用 PXI 兼容模块。在这些情况下，用户所需要的是模块的基本功能而不是完整的 PXI 特性。

2. PXI 规范的电气性能

许多仪器应用场合需要而 ISA 总线、PCI 总线或 CompactPCI 背板总线所没有的系统定时能力，PXI 总线通过增加专门的系统参考时钟、触发总线、星形触发线和模块间的局部总线来满足高精度定时、同步与数据通信要求。PXI 不仅在保持 PCI 总线所有优点的前提下增加了这些仪器特性，而且可以比台式 PCI 计算机多提供 3 个仪器插槽，使单个 PXI 总线机箱的仪器模块插槽总数达到 7 个。PCI 总线与 VXI 总线面向仪器领域的扩展性能比较参见表 1.1。

表 1.1 PXI 与 VXI 总线面向仪器领域的扩展性能比较

	参考时钟	触发线	星形总线	局部总线
VXI	10 MHz ECL	8 TTL & 2 ECL	仅 D 尺寸系统	12 线
PXI	10 MHz TTL	8 TTL	每槽一根	13 线

(1) 参考时钟

PXI 规范定义了将 10MHz 参考时钟分布到系统中所有模块的方法。该参考时钟可被用作同一测量或控制系统中的多卡同步信号。由于 PXI 严格定义了背板总线上的参考时钟，而且参考时钟所具有的低时延性能使各个触发总线信号的时钟边缘更适于满足复杂的触发协议。

(2) 触发总线

如表 1.1 所示，PXI 不仅将 ECL 参考时钟改为 TTL 参考时钟，而且只定义了 8 根 TTL 触发线，不再定义 ECL 逻辑信号。这是因为保留 ECL 逻辑电平需要机箱提供额外的电源种类，从而显著增加 PXI 的整体成本，从而有悖于 PXI 作为 21 世纪主流测试平台的初衷。

使用触发总线的方式可以是多种多样的。例如，通过触发线可以同步几个不同 PXI 模块上的同一种操作，或者通过一个 PXI 模块可以控制同一系统中其他模块上一系列动作的时间顺序。为了准确地响应正在被监控的外部异步事件，可以将触发从一个模块传给另一个模块。一个特定应用所需要传递的触发数量是随事件的数量与复杂程度而变化的。

(3) 星形触发

PXI 星形触发总线为 PXI 用户提供了只有 VXI D 尺寸系统才具有的超高性能 (ultra-high performance) 同步能力。如图 1.6 所示，星形触发总线是在紧邻系统槽的第一个仪器模块槽与其他 6 个仪器槽之间各配置了一根唯一确定的触发线形成的。在星形触发专用槽中插入一块星形触发控制模块，就可以给其他仪器模块提供非常精确的触发信号。当然，如果系统不需要这种超高精度的触发，

也可以在该槽中安装其他的仪器模块。

应当提出, 当需要向触发控制器报告其他槽的状态或报告其他槽对触发控制信号的响应情况时, 就要使用星形触发方式。PXI 系统的星形触发体系具有两个独特的优点: 一是保证系统中的每个模块有一根唯一确定的触发线, 这在较大的系统中, 可以消除在一根触发线上组合多个模块功能这样的要求, 或者人为地限制触发时间。二是每个模块槽中的单个触发点所具有的低时延连接性能, 保证了系统中每个模块间非常精确的触发关系。

(4) 局部总线

如图 1.5 所示, PXI 局部总线是每个仪器模块插槽与左右邻槽相连的链状总线。该局部总线具有 13 线的数据宽度, 可用于在模块之间传递模拟信号, 也可以进行高速边带通信而不影响 PCI 总线的带宽。局部总线信号的分布范围包括从高速 TTL 信号到高达 42V 的模拟信号。

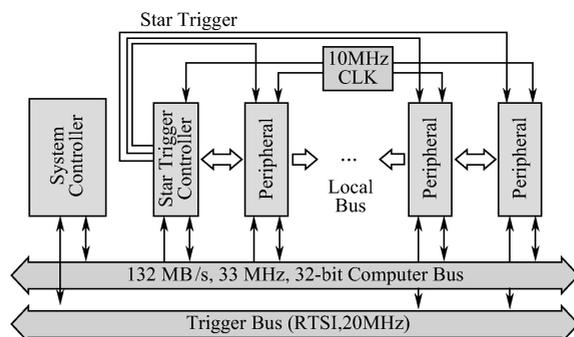


图 1.5 PXI 总线电气性能

(5) PCI 性能

除了 PXI 系统具有多达 8 个扩展槽 (1 个系统槽和 7 个仪器模块槽) 而绝大多数台式 PCI 系统仅有 3 个或 4 个 PCI 扩展槽这点差别之外, PXI 总线与台式 PCI 规范具有完全相同的 PCI 性能。而且, 利用 PCI-PCI 桥技术扩展多台 PXI 系统, 可以使扩展槽的数量理论上最多能扩展到 256 个。其他的 PCI 性能还包括:

- ① 33MHz 性能。
- ② 32 位和 64 位数据宽度。
- ③ 132MB/s (32 位) 和 264MB/s (64 位) 的峰值数据吞吐量。
- ④ 通过 PCI-PCI 桥技术进行系统扩展。
- ⑤ 即插即用功能。

(6) 软件性能

像其他总线标准体系一样, PXI 定义了保证多厂商产品互操作性的仪器级 (即硬件) 接口标准。与其他规范所不同的是 PXI 在电气要求的基础上还增加了相应的软件要求, 以进一步简化系统集成。这些软件要求就形成了 PXI 的系统级 (即软件) 接口标准。

PXI 的软件要求包括支持 Microsoft Windows NT 和 Microsoft Windows 95 (WIN32) 这样的标准操作系统框架, 要求所有仪器模块带有配置信息 (configuration information) 并支持标准的工业开发环境 (如 NI 的 LabVIEW、LabWindows/CVI 和 Microsoft 的 VC/C++、VB 和 Borland 的 C++ 等), 而且必须是符合 VISA 规范的设备驱动程序 (WIN32 device drivers)。

对其他没有软件标准的工业总线硬件厂商来说, 他们通常不向用户提供其设备驱动程序, 用户通常只能得到一本描述如何编写硬件驱动程序的手册。用户自己编写这样的驱动程序, 其工程代价 (包

括要承担的风险、人力、物力和时间)是很大的。PXI 规范要求厂商而非用户来开发标准的设备驱动程序,使 PXI 系统更容易集成和使用。

PXI 规范还规定了仪器模块和机箱制造商必须提供用于定义系统能力和配置情况的初始化文件等其他一些软件要求。初始化文件所提供的这些信息是操作软件用来正确配置系统必不可少的。例如,通过这种机制,可以确定相邻仪器模块是否具有兼容的局部总线能力。如果信息不对或者丢失,将无法操作和利用 PXI 的局部总线能力。

利用传统总线 GPIB、VXI 和 PXI 组建的系统多数是集成式自动测试系统,即使是组建分布式系统,距离也受到很大的限制。

1.2 分布式系统

1.2.1 分布式系统概述

计算机技术的发展可以通过使用计算机的不同方式来描述。在 20 世纪 50 年代,计算机是串行处理机,一次运行一个作业直至完成。这些处理机通过一个操作员从控制台操纵,而对于普通用户则是不可访问的。在 20 世纪 60 年代,需求相似的作业作为一个组以批处理的方式通过计算机运行以减少计算机的空闲时间。同一时期还提出了其他一些技术,如利用缓冲、假脱机和多道程序等的脱机处理。20 世纪 70 年代产生了分布式系统,不仅作为提高计算机利用率的手段,也使用户离计算机更近了,用户可以在不同的地点共享并访问资源。20 世纪 80 年代是个人计算机的 10 年:人们有了自己专用的计算机。由于基于微处理器的系统所提供的出色的性能/价格比和网络技术的稳步提高。20 世纪 90 年代成为分布式系统的 10 年。

若一个系统的部件在不同地方,部件之间要么不存在或仅存在有限的合作,要么存在紧密的合作,则该系统就是分散式系统。当一个分散式系统不存在或仅存在有限合作时,就被称作网络系统;否则就被称为分布式系统,其表示在不同地方的部件之间存在紧密的合作。如果一个系统具有多个处理单元、硬件互连、处理单元故障无关、共享状态等特征,它就是一个分布式系统。

分布式系统可以有不同的物理组成:一组通过通信网络互连的个人计算机,一系列不仅共享文件系统和数据库系统而且共享 CPU 周期的工作站(而且在大部分情况下本地进程比远程进程有更高的优先级,其中一个进程就是一个运行中的程序),一个处理机池(其中终端不隶属于任何一个处理机,而且无论本地进程还是远程进程,所有资源得以真正地共享)。

分布式系统是无缝的,也就是说网络功能单元间的接口很大程度上对用户不可见。分布式计算的思想还被应用在数据库系统、文件系统、操作系统和通用环境中。

另一种表示同样思想的说法是用户把系统看成一个虚拟的单处理机而不是不同处理机的集合。向分布式系统发展的主要推动因素如下。

(1) 固有的分布式应用。分布式系统以一种很自然的方式开始存在。例如,在人类社会中,人群在地理上是分布式的并且分布式地共享信息。一方面,一个分布式数据库系统中的信息产生于不同的分支机构(子数据库),因此本地访问可以很快进行;另一方面,系统也提供了全局视图来支持各种全局操作。

(2) 性能/成本。分布式系统的并行性减少了处理瓶颈,全方位地提高了性能。也就是说,分布式系统提供了更好的性能价格比。

(3) 资源共享。分布式系统能有效地支持不同地方的用户对信息和资源(硬件和软件)的共享。

(4) 灵活性和可扩展性。分布式系统可以增量扩展,并能方便地修改或扩展系统以适应变化的环

境而无须中断其运行。

(5) 实用性和容错性。依靠存储单元处理单元的多重性，分布式系统具有在系统出现故障的情况下继续运行的潜力。

(6) 可伸缩性。分布式系统容易扩大规模以包括更多的资源（硬件和软件）。

目前对分布式系统主要有两种刺激因素：技术上的变化和用户的需求。技术上的变化有两方面：微电子技术的进步生产出快速而廉价的处理器；通信技术的进步使得高效的计算机网络进入实用阶段。

计算机之间的长距离且相对慢速的通信链路长期以来就存在着，然而出现了快速、廉价且可靠的局域网（LAN）技术。这些局域网通常以 10~100Mb/s（兆比特每秒）的速率运行；与此同时，城域网（MAN）和广域网（WAN）也变得越来越快和更加可靠。通常情况下，局域网跨越的地域直径不超过几公里，城域网可覆盖的直径达几十千米，广域网可扩展到整个世界。最近异步传输模式（ATM）被认为是未来的新兴技术，它可以为局域网和广域网提供高达 1.2Gb/s（千兆比特每秒）的数据传输速率。

在用户需求上，很多企业实际上都是相互合作的，例如办事处、跨国公司、大学计算中心等，它们都要求共享资源和信息。

1.2.2 分布式系统结构及特点

分布式系统中的计算机、处理器，或更准确地说分布式系统中的进程，又称为分布式系统的自治节点。“自治”意味着这些节点有自己的控制机制，所以并行计算机不能被认为是分布式系统。作为软件的概念，运行中的系统可以被理解为一个能够进行通信的进程的集合。这些进程有时能够在一台计算机上运行。当然，在大多数情况下，一个分布式系统至少包含通过硬件连接的多个处理器或多台计算机，如图 1.6 所示。

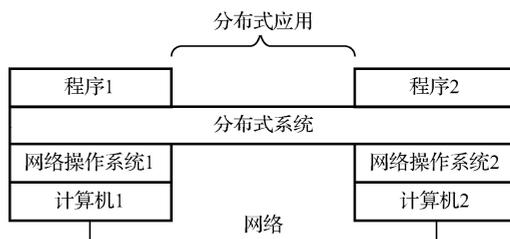


图 1.6 分布式系统

从硬件来看，构成分布式系统的计算机是自治的或者说是独立的；其次，从软件来看，用户把分布式系统看成是一个而不是多个计算机系统。由此引出分布式系统的几个重要特征：

- 系统对用户隐藏了其中不同计算机的差异和通信方式。
- 用户同系统的交互方式是统一和一致的，而不管实际处理发生的地点和时间。
- 系统相对来说易于扩展和调整规模，因为系统隐藏了计算机加入和退出系统的细节。
- 系统可以做到持续可用，因为用户可能察觉不到损坏的系统组件被替换，新的组件的加入可以服务更多的用户。

分布式系统可以使程序员从底层的、复杂的和烦琐的工作中解放出来，更好地专注于应用逻辑的实现。分布式应用的开发从针对操作系统的开发转变为针对一个分布式系统的开发。

以下是分布式系统应具有的属性：

- (1) 进程数目任意，每个进程也被称作一个逻辑资源。
- (2) 处理器数目任意，每个处理器也被称作一个物理资源。
- (3) 基于消息传递的通信，提供了合作式消息传递方式。
- (4) 进程间合作，或者说多个进程用于协同解决同一个任务而不是几个独立的任务。
- (5) 通信延迟，两个处理单元（PE）间的通信延迟不可忽略。
- (6) 故障独立，没有任何单个逻辑或物理的资源故障会导致整个系统的瘫痪。

(7) 故障化解, 即系统必须提供在资源故障的情况下重新配置系统拓扑和资源分配的手段。

基于以上定义可以看出: 计算机网络(局域网、城域网和广域网)不是分布式系统, 这是因为不同站点的进程没有协同工作; 一个物理共享存储器的多处理机不是分布式系统, 因为它没有故障独立性。分布式共享存储器是一个逻辑共享存储器系统, 它具有资源故障独立性并支持故障化解的特点, 因此该系统可以被当作特殊的分布式系统。

在一个分布式系统中, 一系列为了解决同一个问题而合作的进程运行在不同的 PE 上, 用户可能知道也可能不知道这些进程的位置; 在 workstation 模型(C/S 模型)中, 通过区分本地进程和远程进程, 用户通常知道进程的位置, 系统通过支持进程迁移可在不同的 PE 之间共享 CPU 周期; 在处理机池模型中, 用户不知道进程的位置。处理机池中的 PE 没有直接隶属于它们的终端, 分布式共享存储器模型就是一种特殊的处理机池模型。

1.2.3 分布式系统的优势

从分布式系统角度来分析, 计算机硬件和操作系统是通过网络连接的一个分布式资源系统。资源可以是系统中的任何东西, 主要有计算机、打印机、存储设备、文件系统、数据、Web 页、网络等。基于以上特点分布式系统比集中式系统有以下几个优势。

1. 资源共享

仅从字面上理解, 资源共享并非分布式系统中的独有特征, 集中式计算机系统也共享资源。这里要谈的共享恰恰不是集中式资源的共享, 而是分布式资源的共享。只有从这个角度理解这一要求, 才能体会出分布式系统中资源共享的深层次含义。

这里要强调的共享可以分成两种: 一是硬件资源共享, 包括 CPU、存储器、大容量磁盘、打印机和其他外部设备等; 二是软件资源共享, 包括软件工具、软件平台、商用软件、软构件及软部件等。

为了完成上述两种资源的共享, 必须进行管理, 这就需要提供资源管理程序, 每组共享资源一般属于某台计算机。为了使这些资源很好地为大家所共享, 在机器中都要设置一个资源管理程序, 用于处理其他用户对于这些资源的共享要求。

例如, 在客户/服务器模型中, 服务器提供各种共享资源服务, 如文件服务、打印服务或数据库服务等。客户由用户直接使用, 处理与用户的交互(用户输入和屏幕显示), 负责向服务器发送请求, 等待并接收服务器发回的应答信息, 处理后显示给用户。在该模型中, 客户和服务器本身并不要求必须是计算机, 可以是各种处理进程。

2. 开放性

分布式系统可以大到通过互联网(Internet)连接成千上万台机器形成的全球性系统, 也可以小到由局域网(LAN)连接几台机器形成的小系统。最小的系统中可能只有三五台计算机, 而最大的系统则可能包含成百上千甚至上万台计算机。而不管系统多大, 其系统软件和应用软件不需要变化或很少变化就能正常运行。

在分布式系统的客户机和服务器中, 提供服务的软件应该是可扩充的, 所以对开放系统的一般要求为“可以提供多种用户能够修改和扩充的设施”, 客户机和服务器需要系统软件来调度任务的执行, 并使它们可以互相通信, 这就是可扩充性。根据应用的需要, 系统应是可裁减的, 即删除系统中的某些软件或硬件单元, 系统仍能正常工作。

分布式系统应该提供一个开放的服务集合, 可能有许多不同的服务, 一个服务也可能有许多不同的版本。例如, 不同的文件命名和访问方法可能在一种工作站上提供类似于 MS-DOS 的设施, 在另一

种工作stations上提供类似于 UNIX 的设施，每个客户程序可为特定应用选择并装载合适的设施进入其执行环境。同样，系统能使标准化的硬件做到即插即用。

这些性能统称为开放性。

3. 并发性

并发性和并行性在分布式系统中是一种内在的特征。在分布式系统中有许多计算机，每台计算机都有自己的 CPU 和存储器。若有 M 台计算机，每台计算机中有一个 CPU，那么就会有 M 个进程并行执行。从分布式系统对于资源共享的基本要求来看，可能有以下两种并发性。

(1) 许多用户同时发出命令并与机器交互。在这种情况下，应用进程都在用户工作stations上运行（并行），相互之间没有冲突。

(2) 许多服务器进程并发运行，每个进程响应不同的客户请求。在这种情况下，服务器之间存在并行进程，每台服务器中又存在并发进程，这些并发进程要响应不同的请求，但有可能要共享同一资源，因此必须解决并发控制问题。

4. 容错性

首先要承认计算机是会出错的，现在要讨论的问题是出错后怎么办？即容错。容错有两个基本方法，即硬件冗余和软件恢复，这些方法同样适用于分布式系统。

分布式系统由于其结构特征，其直接效果就是计算机故障的不显性。一个工作stations的故障只影响到一个用户，而不影响其他用户需要的服务。如果系统中有几个类似的服务器，即使一个服务器出现故障了，也不会对用户需要的服务构成影响。最常见的服务就是打印和文件服务。在文件服务中，文件可以在几个服务器上存放副本来获得此特征。

一般情况下，当程序出错时，该程序所处理的计算任务是不完全的，它所影响的永久性数据将会不一致。因此，在分布式系统中，如果客户机或服务器上的软件出现故障，需要将永久存放的数据恢复到与故障前一致的状态。这一问题仍是分布式系统中正在研究的课题。一种办法是建立基于事务的文件服务器，它能保证这些服务器操作的原子性，即要么连续执行一组修改操作，要么不执行任何操作。

1.3 分布式测试系统

1.3.1 分布式在测试领域中的重要性

分布式测试是指测试系统的软硬件分布在网络中的计算机上，仅仅通过消息传递机制进行数据通信和动作协调，实现对测试仪器的远程监控。它将分散在不同的地理空间中的各种不同测试设备挂在网络上，通过网络控制命令的下达、信号和数据的传输，实现跨地区、跨空间、跨平台的资源及信息共享和仪器设备的协调工作，共同完成复杂的测试任务。

从分布式网络化测试的发展需求上，随着科学技术的不断发展，测试任务日趋复杂，试验中信号分散、数量多、种类繁杂的情况越来越多，组建分布式网络化测试系统就成为测试的最佳选择。对于某些测试对象存放地点分散，测试项目很多，如测速度、测加速度、测功率和频率、地面遥测遥控等，监测点比较多而且不集中。这样的测试环境，如果采用集中式的测试系统显然是不可能的，因此要考虑分布式的网络化测试系统。分布式网络化测试系统通过局域网和 Internet，把分布于各测点、独立完成特定功能的测量设备用计算机连接起来，以达到测量资源共享、分散操作、集中管理、协同

工作、负载均衡、测量过程监控和设备诊断等目的。分布式网络化测试系统不再局限于本地测试，可以通过网络进行远程测试，允许不同地理位置的多个用户一起交互，以完成特定的测试任务，这种方式可以有效地使用那些昂贵和复杂的测试仪器，从单一的外置去控制多个不同地理位置的仪器并完成复杂的测试任务，测试网络由原来的几种模式变成分布模式，由单纯的本地模式转变为远程模式，或者远程与本地相结合的模式，是具有开放性、互操作性、分散性、网络化、智能化的测试系统。

美国在 21 世纪初就制定了以网络为中心的数据策略规划，把基于应用的网络系统改编成基于服务的网络系统，并提出了网络中心的概念。为将测试综合到网络为中心的数据环境中，相继提出了以网络为中心的测试、以网络为中心的诊断及以网络为中心的操作等概念，并且在上述概念基础上提出了以网络为中心的诊断框架等思想。为促进以网络为中心的测试及诊断技术在各个领域的广泛应用，美国安排了一系列的演示验证计划项目，并取得了一定的成效。主要的验证项目如下：

- C-17 的高级交互式维护系统，以及 F16/F22 和波音公司使用的综合维护信息系统，它们是以网络为中心的测试信息系统的雏形；
- 波音公司对飞机测试系统进行快速诊断，建立了分布式数据收集系统，用于实现测试数据的共享；
- 洛克希德·马丁公司在为 F-35 飞机研制的 LM-STAR 中，将诊断和测试功能分离，而利用构建的信息平台实现资源和数据共享；
- Hamilton Software 公司采用组件技术，建立综合测试和诊断信息平台，共享测试与诊断资源和数据，并在美国空军 TRC-170 微波通信机上进行验证；
- 2008 年在美国海军 F/A-18 自动维修环境中进行 NCDF 技术扩展，使其支持以网络为中心的诊断技术，并在典型装备 SHARP 和 ATFLIR 中得到了成功的应用；
- 美国海军 IDATS 团队针对航空电子设备开发了以网络为中心的维护信息系统，实现了 O-level、I-level 和 D-level 各级别间信息的互联互通，在民航领域得到了成功的应用。

由以上应用可以看出，国外的网络测试系统很好地实现了测试各要素的互联、互通和共享，成功实现了资源和数据共享。

1.3.2 分布式测试系统的组建

分布式测试系统的组成方式多种多样，如采用 VXI 总线或 GPIB 总线的程控仪器结构，如图 1.7 所示。这种结构要求在每个监测点建立一套独立的测试系统，分别由终端计算机和 VXI 仪器、PXI 仪器或 GPIB 仪器组成，然后每个终端机和服务器通过网络连接，从而组成分布式测试系统。这种结构中，每个节点都由终端计算机控制，中心服务器不具备远程控制能力。每个节点，不管监测参数多少，哪怕只监测一个参数，也要由一台计算机和一台仪器组成测试系统，系统结构复杂且造成系统资源浪费。随着网络技术的不断发展，为仪器总线发展面临的问题提供了解决办法。新一代自动测试系统模块化架构平台如图 1.8 所示。由网络化测试仪器组成的分布式测试系统较好地解决了这一系列问题。

网络化仪器组建的分布式测试的最大优点是资源共享，控制分散，信息集中，多个用户可以共享测量仪器，改变了测量技术以往的面貌，打破了在同一地点进行数据采集、分析处理和显示的传统模式。

构建分布式的自动测试系统需要考虑以下基本要素。

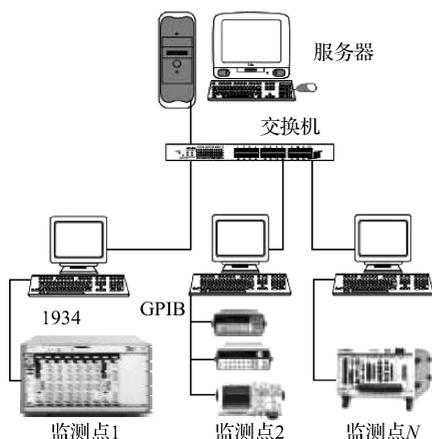


图 1.7 利用传统仪器构建的分布式测试系统

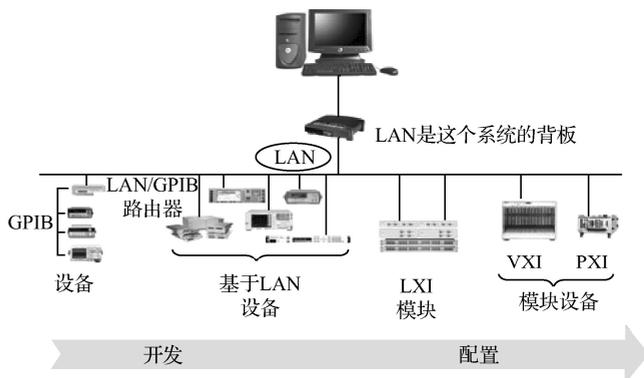


图 1.8 利用网络化测试仪器组建的分布式测试系统

1. 开放性和各子系统间的相互操作性

测试网络的体系结构应该是开放性的，只有这样不同厂家提供的不同类型的网络化测试设备才有可能具有通用性的特点，才能在真正意义上实现“互联、互通、互操作”。

2. 系统的实时性和各子系统间的时间同步

测试网络在系统实时性方面要满足两个基本要求：有限的时间延时和可靠的信号传输，即在限定的时间范围内将信息正确地传输到目的地。网络的实时性是一个复杂的问题，在架构网络化的自动测试系统时，需要制定合适的网络实时通信决策，以提高网络通信服务质量。各个子系统间的协调工作需要同步信号的配合，如何进行跨地域、跨平台的子系统间的信号和时间同步是实现高质量的网络化自动测试系统的关键。

3. 可靠性和安全性

因为自动测试系统可能在条件恶劣的环境下使用，所以网络化的自动测试系统在软硬件设计时，必须考虑较高的可靠性和抗干扰性。除了测试功能的可靠安全之外，系统自身的网络安全也是需要考虑的一个方面。如何防范病毒、黑客的入侵和非法操作，也是设计一个安全可靠的自动测试系统时需要重点考虑的方面。

4. 成本低廉

成本问题永远是自动测试系统设计中一个需要考虑的因素。有的时候，因为性能指标的缘故，在成本问题上不得不做出让步。但是在同样可以满足设计要求时，成本低廉的设计方案往往是最受用户欢迎的。

1.3.3 测试系统网络化的发展

当前的分布式测试系统涉及的主要还是基于局域网。

未来的测试网络将基于广域网和无线网，如图 1.9 所示，能够集成多种测试资源，能够支持各级测试人员或辅助人员有效地参与到远程测试任务中来。在分布式仪器网络系统中，由主控机发出指令，各节点上的测试仪器采集大量测试数据进行网络接入和传输，将数据传输给主控机。主控机进行测试信息融合，给出最终测试结果。测控网中存在大量不同类型和特征的信息需要在网络中进行交换、共

享，以及在不同的仪器终端类型上进行呈现。典型的有：各种仪器操控命令，测试信号数据、分析处理和诊断决策信息，以及仪器和装备技术手册信息，等等。基于分布式仪器复杂网络的设备测试和诊断往往需要依赖于并行计算技术来充分利用每一个网络节点上的仪器资源。

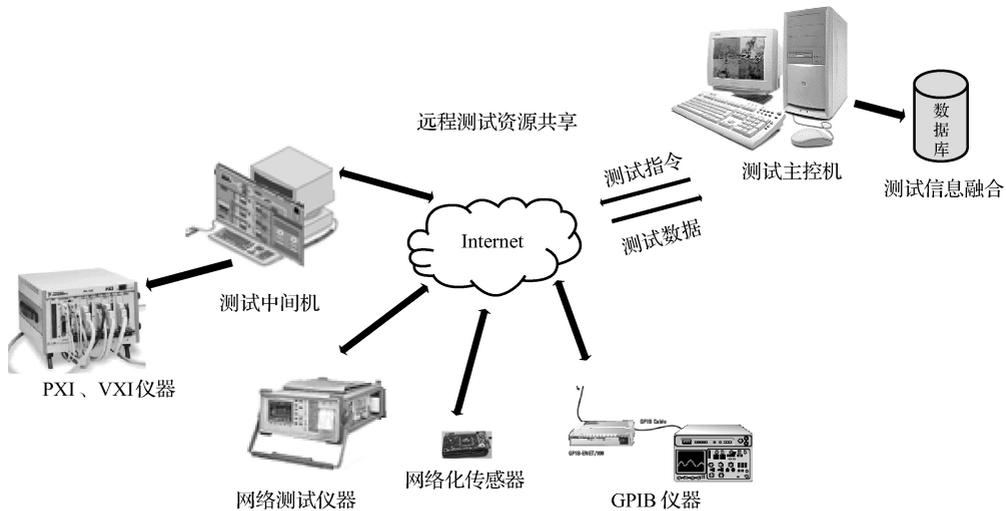


图 1.9 网络化的分布式测试系统

开放体系结构是网络化测试系统的基本特征，它包括构成网络测试系统的测试网络、测试服务器、网络路由、信息获取单元几部分。① 测试网络是适用于测量与控制任务的、具有统一时间支持能力和时间确定性数据传输功能的新型网络，可以传输数据（包括控制指令）及时间，是网络仪器数据链、控制链和时间链所需的物理载体，存在形式可以是无线网络和有线网络，包括 GSM 网络、CDMA 网络、Internet、局域网以及各种现场总线及其混合网络等。② 测试服务器由时间服务单元、处理控制单元和数据库单元组成，对外具有时间端口、测试网接口和人机接口。它是网络仪器中调度资源和完成测试任务的核心设备，具有统一时间支持和时间确定性数据处理功能，具备网络互联能力。③ 测试网络路由是网络仪器中实现资源接入、访问与控制的边界设备，具有统一时间支持和时间确定性数据交换功能，具备探头接入和网络互联能力。由时间服务单元、接入控制单元以及附属单元构成，对外具有时间端口、网络接口和一组测试接口。④ 测试信息获取单元是网络仪器中实现信息获取的前端设备，以传感器（或执行器）为核心构成，具有测试信息完整性支持能力。其构成应包括时间服务单元、数据预处理单元、调理单元、A/D 单元、附属控制单元、附属信息单元，以及时间端口和测试接口。

在结构组成方面，本书作者将网络化测试系统在逻辑上划分为接入层、传输层和构造层 3 层，采用统一时间支持体系向网络仪器提供时间统一和时钟再生服务。① 接入层，位于网络仪器三层体系结构的底层，包括信息获取单元和测试网络路由两种设备。该层通过信息获取单元的接入以及单元模块的构建，允许上层通过标准的接口和协议访问测试资源。② 传输层，由测试网络实现测试服务器与测试路由之间的互联，并在统一时间支持体系的支持与约束下完成时间确定性的数据传输。传输层定义了网络仪器的核心传输控制协议，实现各种资源间的数据交换，包括时间确定性的数据传输。③ 构造层，主要实现仪器构造，通过测试服务器将各具有互联和共享能力的处理控制单元、数据库单元以及信息获取单元进行连接与构造，形成具有特定测试功能的网络仪器层。

在广域网中，测试仪器之间的同步很难像局域网中达到微秒或纳秒精度，因此系统的同步含义已经从“信号触发同步”转变为“远程测试与中心操作人员之间的交互”同步，具体表征为一种数据层

“准同步”，如图 1.10 所示。

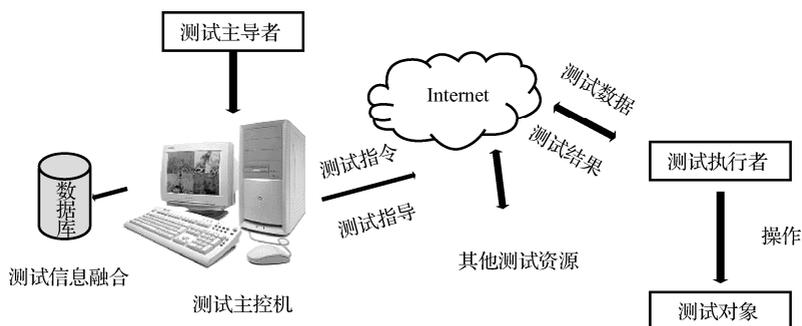


图 1.10 远程测试的协同合作

为了解决各远程测试系统进行多源数据融合过程中，各测试端起始工作时间不同步、采样周期不一致等导致的融合时间异步问题，需要在数据层中给测试数据加时间标签。这使得构建测试系统的网络仪器应有时间记录功能，给测试数据增加时间标签，如图 1.11 所示。

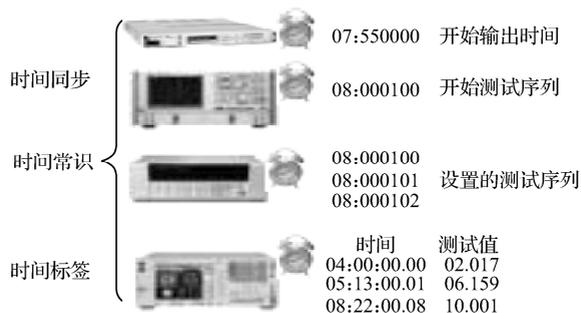


图 1.11 带时间标签的网络化测试仪器

参 考 文 献

- [1] 马敏, 夏侯士戟, 黄建国. 并行自动测试系统分层建模及性能评估方法研究. 北京: 系统仿真学报, 2010.01.01, 2010 (12): 2779~2783.
- [2] 马敏, 黄建国, 夏侯士戟. 一种基于 Petri 网和 AGA 算法的测试系统死锁预防策略. 北京: 仪器仪表学报, 2008.1.15, (01): 33~37.
- [3] 马敏, 兰京川, 黄建国. 并行测试中死锁避免的设计与仿真. 北京: 系统仿真学报, 2008.12.5, (23): 2779~2783.
- [4] 马敏, 黄建国, 夏侯士戟. 基于自适应模糊 Petri 网的雷达故障诊断方法研究. 北京: 仪器仪表学报, 2008.2.15, (02): 261~265.
- [5] 马敏, 陈光, 刘治国, 谭细金. 边界扫描测试实验系统的设计与开发. 成都: 实验科学与技术, 2009.6.28, (03): 18~112.
- [6] The PXI System Architecture. National Instruments. 1997.9.
- [7] A New, Open Specification for Modular Instrumentation. National Instruments. 1997.9.
- [8] 赵会兵. 虚拟仪器技术规范与系统集成. 北京: 清华大学出版社, 2016.

- [9] 张世箴. 自动测试系统. 成都: 电子科技大学出版社, 1994.
- [10] 杨安禄, 陈长龄. 电子仪器接口技术. 成都: 电子科技大学出版社, 1994.
- [11] 陈光禹. VXI 总线测试平台技术. 成都: 电子科技大学出版社, 1996.

思 考 题

1. 传统的集成式测试系统主要有哪几种?
2. 什么是分布式系统? 分布式系统的重要特征是什么?
3. 分布式系统有何特点?
4. 构建分布式的自动测试系统需要考虑哪些基本要素?