



普通高等教育“十三五”规划教材
测试、计量技术及仪器系列规划教材

网络化测试仪器技术

/ 马 敏 编著 /



中国工信出版集团



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>

“五”规划教材
测试、计量技术及仪器系列规划教材

网络化测试仪器技术

马 敏 编著

电子工业出版社
Publishing House of Electronics Industry
北京·BEIJING

内 容 简 介

本书从实用性和先进性出发,较全面地介绍网络化测试仪器的开发技术。全书主要包括:绪论、网络化分布式测试系统的形成、计算机网络协议、TCP/IP 协议测试、LXI 网络化测试仪器、基于 IEEE 1588 的网络同步技术、网络化测试仪器软件技术和无线网络协议及仪器,提供配套电子课件、习题参考答案、教学视频等。

本书可作为高等学校仪器科学、电子测量、电路与系统、检测计量、自动测试、计算机网络测试技术等专业高年级本科生和研究生相关课程的教材,也可供相关领域的工程技术人员学习和参考。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

网络化测试仪器技术 / 马敏编著. —北京:电子工业出版社, 2018.9

ISBN 978-7-121-34934-8

I. ①网… II. ①马… III. ①网络化—分析仪器 IV. ①TH83

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 196841 号

策划编辑:王羽佳

责任编辑:谭丽莎 特约编辑:周宏敏

印 刷:北京京师印务有限公司

装 订:北京京师印务有限公司

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编:100036

开 本:787×1092 1/16 印张:15.25 字数:440 千字

版 次:2018 年 9 月第 1 版

印 次:2018 年 9 月第 1 次印刷

定 价:39.90 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010) 88254888, 88258888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

本书咨询联系方式:(010) 88254535, wylj@phei.com.cn。

前 言

当前测试系统逐渐与网络结合,2004 年 IEEE 就颁布了网络仪器 LXI 标准,现在这种网络仪器与设备已经逐渐取代了传统的测试仪器设备成为主流,安捷伦、泰克等国外仪器厂商已经推出了 500 多种网络仪器。本书主要针对最新的网络化测试技术及网络仪器的开发和设计原理进行描述。

本书中的知识点并不局限于网络仪器设计的叙述,还介绍了有线网络和无线网络知识,如 TCP/IP 协议、802.11 协议及其网络软件数据包的测试技术等,可扩展学生计算机网络基础知识及测试技术;书中讲述了 VXI-11 网络发现协议的原理和实现,该协议不但可以通过网络发现测试仪器,也可应用于电子行业任何网络设备的查找和发现,具有推广性;书中重点讲述的 IEEE 1588 同步协议原理与实现,更是已经广泛用于移动、电力、航空航天等各个领域设备的网络同步;书中还有先进的无线网络仪器技术介绍,进一步拓展学生的知识。

本书通过绪论讨论当前网络测试的发展方向,网络测试仪器技术的主要内容共分 7 章。包括:

第 1 章,首先介绍自动测试系统分布式发展趋势,然后着重介绍分布式自动测试系统的体系结构。

第 2 章,介绍网络 TCP/IP 协议的发展、原理和应用。

第 3 章,介绍网络 TCP/IP 协议的测试软件使用、测试流程、数据协议包分析的过程。

第 4 章,阐述构建分布式自动测试系统中关键的网络化测试技术——LXI 仪器的特性、功能、软硬件设计规范与设计实现过程。

第 5 章,阐述测试技术中触发与同步技术的重要性,然后着重介绍网络化设备中 IEEE 1588 同步技术的设计与实现。

第 6 章,阐述组建网络时经常用到的 VXI-11 网络发现协议及其实现。

第 7 章,阐述无线网络技术标准及无线网络仪器的开发。

本书特色是工程实用性较强,书中介绍的网络协议与网络仪器和设备都讲解了其实现的过程,是作者长期以来承担工程项目的设计成果的经验总结。

通过本书的学习,读者可以了解最新的网络测试系统及网络仪器、设备技术,并可以掌握实际的网络仪器软硬件设计技术,为高年级本科生或研究生后续学习或从事网络仪器及设备的开发、网络系统测试领域的工程项目打好基础。

本书适用于高等学校仪器科学、电子测量、电路与系统、检测计量、自动测试、计算机网络测试技术等专业高年级本科生或研究生的教学。

本书提供配套电子课件、习题参考答案、教学视频等,请登录华信教育资源网(www.hxedu.com.cn)免费注册下载。本书第 4 章介绍 LXI A 级仪器 LXI 触发盒,该触发盒可将非网络设备或仪器增加 IEEE 1588 网络同步触发功能,网络同步精度局域网可达纳秒级。本书针对该触发盒的应用设计了相关的课程实验,扫描书中二维码可在线观看教学视频。触发盒咨询电话 028-61831308/61831311。

本书主要总结了网络化仪器(如 LXI 万用表、LXI 示波器、LXI 逻辑分析仪、LXI 任意波形发生器和 LXI 触发盒等产品)开发过程中的技术经验,在此向本教研室和一起开发这些仪器的钟世春、金建勋、姜晓琳、徐泽君、何鹏、王贝贝、张晓思、贾俊伟、李娇、赵强、黄小梅等硕士研究生表示感谢。本书得到电子科技大学教务处及各方人士的指导、支持和帮助,电子工业出版社的王羽佳编辑为

本书的出版做了大量工作，在此一并表示感谢！

本书的编写参考了大量近年来出版的相关技术资料,吸取了许多专家和同仁的宝贵经验,在此向他们深表谢意。

由于网络技术发展迅速，作者学识有限，书中误漏之处难免，望广大读者批评指正。

本书可作为高等院校计算机专业及相关专业的教材，也可供从事计算机工作的工程技术人员参考。
编著者 程利

目 录

绪论	1
0.1 测试总线技术的发展简史	1
0.1.1 GPIB——测试总线的先行者	1
0.1.2 VXI——测量标准的开放者	1
0.1.3 PXI——测试技术的生力军	2
0.1.4 LXI——测试与网络的结合者	3
0.2 网络化测试技术概述	3
0.3 本书主要内容	4
参考文献	5
第1章 网络化分布式测试系统的形成	6
1.1 传统集成式测试系统简介	6
1.1.1 GPIB 测试	6
1.1.2 VXI 测试	7
1.1.3 PXI 测试	8
1.2 分布式系统	12
1.2.1 分布式系统概述	12
1.2.2 分布式系统结构及特点	13
1.2.3 分布式系统的优势	14
1.3 分布式测试系统	15
1.3.1 分布式在测试领域中的重要性	15
1.3.2 分布式测试系统的组建	16
1.3.3 测试系统网络化的发展	17
参考文献	19
思考题	20
第2章 计算机网络协议	21
2.1 引言	21
2.1.1 计算机硬件发展概述	21
2.1.2 计算机网络发展概述	22
2.2 TCP/IP 协议的产生和发展	24
2.2.1 TCP/IP 的产生	24
2.2.2 TCP/IP 的发展	24
2.3 网络协议的体系结构	24
2.3.1 IP 网络的特点	24
2.3.2 计算机网络体系结构概述	25
2.3.3 OSI 体系结构	26
2.4 TCP/IP 协议入门	27

2.4.1 TCP/IP 协议与 OSI 参考模型	27
2.4.2 层与协议	29
2.5 TCP/IP 链接层	29
2.5.1 以太网协议	29
2.5.2 MAC 协议	30
2.5.3 广播	31
2.6 TCP/IP 网络层	33
2.6.1 网络层的由来	33
2.6.2 网络层协议分类	34
2.6.3 IP 协议	34
2.6.4 ARP 协议	36
2.7 TCP/IP 传输层	37
2.7.1 传输层的由来	37
2.7.2 UDP 协议	38
2.7.3 TCP 协议	39
2.8 TCP/IP 应用层	45
2.8.1 应用层数据包格式	45
2.8.2 应用层中应用程序分类	46
参考文献	46
思考题	47
第3章 TCP/IP 协议测试	48
3.1 概述	48
3.1.1 TCP/IP 协议测试方式	48
3.1.2 数据包捕获技术概述	48
3.1.3 数据包捕获软件的发展	49
3.1.4 TCP/IP 协议分析软件类型	50
3.2 Wireshark 网络协议分析工具的介绍	51
3.2.1 Wireshark 网络协议分析工具	51
3.2.2 基于 Wireshark 的协议解析	52
3.2.3 数据包协议解析工作原理	52
3.3 Wireshark 网络协议分析工具的基本用法	53
3.3.1 Wireshark 网络协议分析工具的下载与安装	53
3.3.2 抓取报文	58

3.3.3	色彩标识	59
3.3.4	过滤报文	60
3.4	Wireshark 观察基本网络协议	62
3.4.1	三次握手过程分析	62
3.4.2	ARP/ICMP 报文	63
3.4.3	HTTP 报文	64
3.4.4	TCP 重传与重复 ACK	64
3.5	Statistics 统计工具功能详解与应用	68
3.5.1	Statistics 统计工具中的 Summary 菜单	68
3.5.2	Statistics 统计工具中的 Protocol Hierarchy 菜单	68
3.5.3	Statistics 统计工具中的 Conversations 菜单	69
3.5.4	Statistics 统计工具中的 HTTP 菜单	70
3.6	利用 Wireshark 抓取特定数据流	73
3.6.1	抓取特定数据流设置	73
3.6.2	抓取指定 IP 地址的数据流	73
3.6.3	抓取指定 IP 地址范围的数据流	74
3.6.4	抓取发到广播或多播地址的数据流	74
3.6.5	抓取基于 MAC 地址的数据流	74
3.6.6	抓取基于指定应用的数据流	75
3.6.7	抓取结合端口的数据流	75
	参考文献	75
	思考题	76
第 4 章	LXI 网络化测试仪器	77
4.1	LXI 总线的发展	77
4.2	LXI 测试仪器的基本特性	78
4.3	LXI 测试仪器的分类	80
4.4	LXI 测试仪器的结构与电气特性	83
4.5	LXI 测试仪器的网络设置与通信	88
4.6	LXI 测试仪器的触发与同步	92
4.7	LXI 测试仪器 IVI 驱动接口设计方法	95
4.8	网络化测试仪器的设计规范	98
4.9	ES7111 触发盒介绍	109
4.9.1	ES7111 触发盒简介	109
4.9.2	触发盒功能特性介绍	110

4.9.3	ES7111 触发盒产品应用	110
	参考文献	116
	思考题	117
第 5 章	基于 IEEE 1588 的网络同步技术	118
5.1	仪器的同步与触发	118
5.2	IEEE 1588 精确时钟同步协议	119
5.2.1	协议基本原理	120
5.2.2	影响时钟同步精度的因素	121
5.3	IEEE 1588 v1 版协议技术实现	125
5.3.1	硬件获得时间戳设计	125
5.3.2	IEEE 1588 v1 版协议软件实现设计	126
5.4	IEEE 1588 v2 版协议技术实现	137
5.4.1	同步报文类型	137
5.4.2	时钟同步过程	138
5.4.3	最佳主时钟算法	143
5.4.4	边界时钟和透明时钟	147
	参考文献	149
	思考题	150
第 6 章	网络化测试仪器软件技术	151
6.1	网络化测试仪器开发涉及的主要标准	151
6.2	IEEE 488.2 标准	155
6.3	SCPI 指令	156
6.3.1	SCPI 命令参考	157
6.3.2	SCPI 数据交换格式	157
6.3.3	SCPI 仪器类别	157
6.3.4	SCPI 的遵从标准	157
6.4	VPP 规范	158
6.5	虚拟仪器软件结构 VISA	159
6.6	仪器驱动程序开发	161
6.7	IVI 协议	162
6.8	IVI-Signal 协议	165
6.9	VXI-11 协议	168
6.9.1	VXI-11 协议在 LXI 仪器中的作用	168
6.9.2	VXI-11 协议的实现	169
	参考文献	182
	思考题	183

第7章 无线网络协议及仪器	184	7.5.1 ZigBee 介绍	211
7.1 无线网络概述	184	7.5.2 ZigBee 协议标准	212
7.1.1 无线传感器网络	184	7.5.3 ZigBee 的特点及应用	215
7.1.2 无线局域网	186	7.6 蓝牙技术	216
7.1.3 无线网络的发展过程	187	7.6.1 蓝牙技术的产生及发展过程	216
7.1.4 无线局域网的常见拓扑结构	188	7.6.2 蓝牙核心协议	217
7.1.5 无线局域网的特点及应用	189	7.6.3 蓝牙技术的应用	220
7.2 无线网络协议	191	7.7 移动通信系统	220
7.2.1 IEEE 802.11 系列协议标准	191	7.7.1 移动通信系统的发展	220
7.2.2 IEEE 802.11 的工作方式	193	7.7.2 WCDMA 通信系统	222
7.2.3 IEEE 802.11 分层协议	193	7.7.3 LTE 通信系统	224
7.2.4 IEEE 802.11g 协议	195	7.8 其他无线传感技术	225
7.2.5 IEEE 802.11n 协议	196	7.8.1 UWB 技术	225
7.2.6 IEEE 802.15.4 协议	198	7.8.2 IrDA 技术	225
7.2.7 IEEE 802 的其他协议	200	7.9 无线局域网组网方式	226
7.3 MAC 介质访问控制层	201	7.9.1 基本服务子集 (BSS)	226
7.3.1 MAC 层的产生和作用	201	7.9.2 独立基本服务集 (IBSS)	227
7.3.2 无线传感器网络 MAC 协议 介绍	201	7.9.3 扩展服务集 (ESS)	227
7.3.3 无线传感器网络 MAC 协议 分类	203	7.9.4 无线分布式系统 (WDS)	228
7.3.4 无线局域网 MAC 帧结构	204	7.10 无线网络仪器	228
7.3.5 DCF 和 CSMA/CA	207	7.10.1 Android 多分辨率适配性的 测试	229
7.4 Wi-Fi 技术	209	7.10.2 无线数据采集测试	230
7.4.1 Wi-Fi 介绍	209	7.10.3 单点触控操作	232
7.4.2 Wi-Fi 协议标准	209	7.10.4 多点触控操作	232
7.4.3 Wi-Fi 的特点及应用	210	7.10.5 波形数据分析功能测试	233
7.4.4 WLAN 与 Wi-Fi 的区别	211	参考文献	235
7.5 ZigBee 技术	211	思考题	235

2021.11.01	6.7	7.1	5.1	1.2	0.1	0.0	本站
2021.10.01	12.8.000	61.4.000	10.8.000	1.180	4.4.000	0.7.000	港口

0.1 测试总线技术的发展简史

对于当今的电子工业而言，从组件到系统、设计到生产，测量工作皆是不可或缺的一环。工厂必须借助测量获知产品效能，作为产品设计的参考依据。在生产过程中，往往需要测量设备把握产品的命脉；而测量效率往往也与生产效率关系密切，成为决定市场竞争力消长的关键因素。正因为测量技术的重要所在，其成熟与发展过程中的每一步无不吸引着业界关注的目光。从 20 世纪 70 年代以来，测量技术经历了从 GPIB 到 PXI 的变革，而近年来国内厂商在 PXI 技术上的迅速发展壮大，更是值得国内测量用户欣喜的事情。

0.1.1 GPIB——测试总线的先行者

早在 20 世纪 70 年代,为了让计算机控制许多独立的测试仪器,IEEE 定义了一套高速数据传输的协议——488.1/488.2。对于基于计算机的数字化测试仪器,人们将其称为虚拟仪器 (Virtual Instrument)。GPIB 技术就是 IEEE 488 标准的虚拟仪器早期的发展阶段,它的出现使电子测量从独立的单台手工操作向大规模自动测试系统发展。典型的 GPIB 系统由一台 PC、一块 GPIB 接口卡和若干台 BPIB 形式的仪器通过 GPIB 电缆连接而成,使用共同的字串语法控制仪器 (488.2 或 SCPI)。在标准情况下,一块 GPIB 接口可带多达 14 台仪器,电缆长度可达 40 米。GPIB 技术可用计算机实现对仪器的操作和控制,替代传统的人工操作方式,可以很方便地把多台仪器组合起来,形成自动测试系统。

GPIB 测试系统的结构和命令简单,有专为仪器控制所设计的接口信号和牢固的接插件,加之几乎所有独立仪器都有 **GPIB** 接口,因而体现出其简单性和便利性的优势所在。但是 **GPIB** 的缺点也是显而易见的——在传输大量数据时带宽不足,总线接口专用化。因此, **GPIB** 主要应用于台式仪器,适合精确度要求高、但不要求对计算机高速传输的状况时应用。因此,对于更高要求的测量应用,便需要技术方面的进一步革新, **VXI** 总线技术就是在这样的背景下出现的。

0.1.2 VXI——测量标准的开放者

在 GPIB 之后出现的 VXI 总线技术是 VME 总线在仪器领域的扩展 (VXI, VMEbus eXtensions for Instrumentation)。1981 年 10 月, Motorola、Mostek 和 Signetics 宣布它们共同支持基于 VERSAbus 和 Eurocard 模块尺寸的系列板卡, 这就是著名的 VMEbus。1987 年, VMEbus 被 IEEE 正式接受为万用背板总线 (Versatile Backplane Bus) 标准——VMEbus (ANSI/IEEE 1014—1987)。

由于 VME 毕竟不是面向仪器的总线标准,来自 Colorado Data System、Hewlett Packard、Racal Dana、Tektronix 和 Wavetek 等 5 家仪器公司的技术代表于 1987 年 6 月宣布成立了一个技术委员会。同年 7 月,该委员会(即后来的 VXI 总线联合体)发布了 VXIbus 规范的第 1 个版本,几经修改和完善,于 1993 年 9 月 20 日出版发行。VXI 总线标准发展历史如表 0.1 所示。

表 0.1 VXIbus 标准发展史

版本	0.0	1.0	1.1	1.2	1.3	1.4	IEEE 1155
日期	1987.7.9	1987.8.24	1987.10.7	1988.6.21	1989.7.14	1992.4.21	1993.9.20

VXI 总线具有稳定的电源、强有力的冷却能力和严格的 RFI/EMI 屏蔽。它具有标准开放、结构紧凑、数据吞吐能力强（高达 40MB/s 的带宽是 GPIB 的 40 倍）、定时和同步精确、模块可重复利用，以及受到众多仪器厂家支持的优点，很快就得到了广泛的应用。由于是前插拔、模块化的仪器，VXI 系统的组建和使用变得很方便，尤其体现在组建大、中规模的自动测量系统时；VXI 也适合于对速度、精度要求高的场合，因此主要用于军事、航空航天和 ATE 等领域的测量平台。

虽然 VXI 蓬勃发展了一段时日，但是因为组建 VXI 总线要求有机箱、零槽管理器及嵌入式控制器，造价高昂，加之 40MB/s 的带宽对于现今的高速测量装置仍嫌不足，人们又对测量技术提出了更高的要求，此时 PXI 技术应运而生。

0.1.3 PXI——测试技术的生力军

PXI 是 PCI eXtensions for Instrumentation 的缩写。直观地说，CompactPCI+Extensions for Instrumentation=PXI。对于 PXI 的发展，首先要提到的是制定并推广 PXI 规格的组织——PXISA（PXI System Alliance）。PXISA 于 1997 年成立，同年推出了 1.0 版的 PXI 规格。随着 PXISA 接受度的提高，以及 PXI 标准的不断完善，PXI 的规格和相关产品也逐渐走向了标准化的道路。1998 年，PXI 被定为工业标准，PXI 开始快速而稳健地发展。2000 年时，PXI 又推出了 PXI 2.0 版，并于 2003 年 2 月将规格更新至 2.1 版。

为更适于工业应用，PXI 总线方式为 PCI 总线内核技术增加了成熟的技术规范和要求，增加了多板同步触发总线的技术规范，以便使用于相邻模块的高速通信局总线。PXI 还具有高度的可扩展性：PXI 具有 8 个扩展槽，通过使用 PCI-PCI 桥接器，可扩展到 256 个扩展槽，而台式 PCI 系统只有 3~4 个扩展槽，台式 PC 的性能价格比和 PCI 总线面向仪器领域的扩展优势结合起来，便形成了出色的虚拟仪器平台。

PXI 的规格区分为硬件与软件两个部分。其中，硬件部分是基于 CompactPCI 的规格，也就是 PICMG 2.0，建构于 CompactPCI 的机构规格与 PCI 的电气规格之上，加上仪器上所需要的电气信号延伸，即是所谓 PXI 的规格。所以，PXI 的数据传输速率的峰值在 33MHz、32bit 的总线上，可达 132MB/s；在 66MHz、64bit 的总线上更可高达 528MB/s，远远高于 GPIB 与 VXI 接口的传输速率。PXI 背板上的每一个扩充槽都有专用的 10MHz 参考时脉，而时脉偏斜的精确度必须小于 1ns。这样高的精确度使其可作为各扩充槽的基础时脉来达到同步的效果。与其他的总线规格相比，PXI 于软件上对系统控制模块与周边模块进行了规范。例如，PXI 周边模块的厂商，必须提供可适用于 Microsoft Windows 上的驱动程序，而 PXI 控制模块则必须基于 80x86 架构，并可支持 Microsoft Windows。随着各式操作系统的接受度提高，未来将可能加入 PXI 软件的规格制定。除了对软件架构上的规范外，PXI 也制定了硬件描述档案的规格，系统操作人员可以利用这些档案，透过软件管理 PXI 系统上的模块。

PXI 的仪器延伸信号提供了各 PXI 模块之间的一个硬件的管道，不需要经过软件的监督，PXI 的模块可实时地在此管道上利用硬件的信号互相沟通。如此可以减低 CPU 的负担，并加速软件程序的执行。并且基于 x86 架构与广泛采用的 Windows，可以有效降低 PXI 产品的学习曲线与购入成本。

多重的 PXI 模块选择，搭配不同机箱，使得 PXI 可以符合各种应用需求，并且易于维护。如此丰富的产品使得 PXI 目前已在汽车测试、半导体测试、功能性测试、航空设备测试以及军事等诸多领域

得到了广泛的应用。但是 PXI 技术主要用于模块仪器，它依然需要机箱零槽，在网络时代的今天，这种仪器只适用于一些专用系统，不适合很多大型复杂的测试环境。

0.1.4 LXI——测试与网络的结合者

进入 21 世纪后，以太网基的 LXI (LAN eXtensions for Instrument, 局域网的仪器扩展) 规范成为新一代测量仪器接口标准。LXI 接口标准是安捷伦科技公司和 VXI 科技公司共同开发的，它根据两家公司长期的模块化仪器设计经验，整合 GPIB 和 VXI 的成果以及借助个人计算机的以太网接口应用，构成新一代模块化的测量仪器标准平台。2004 年 9 月两家公司推出 LXI 接口规范并成立 LXI 联合体，12 月召开成员大会，出席会议的有 20 多家来自美国、欧洲、亚洲的重要仪器公司，包括 Aeroflex、Analogic、B/K、加州仪器、IOtech、吉时利、泰端达在内。会议通过了 LXI 联合体章程，成立了组织机构，审议了 LXI 接口规范，并在 2005 年第一季度公布开放式的 LXI 标准。至今为止 LXI 标准已经到了 LXI1.4 版本。

LXI 总线的出现代表着网络化测试技术时代的到来。当前国内外网络仪器种类已经达到 500 多种，各种用网络仪器搭建的网络化测试系统应运而生。

0.2 网络化测试技术概述

随着计算机技术、测试技术和网络技术的快速发展，网络化测试已经成为当今测试领域的重要发展趋势。采用网络化测试技术可以有效降低测试系统的成本，实现远距离的测试维护和资源共享。网络化测试系统由分散放置的测试设备通过局域网组成。其所要包含的测试设备种类繁多，各测试设备通过自带的网口或网关与测试网络相连，如图 0.1 所示。

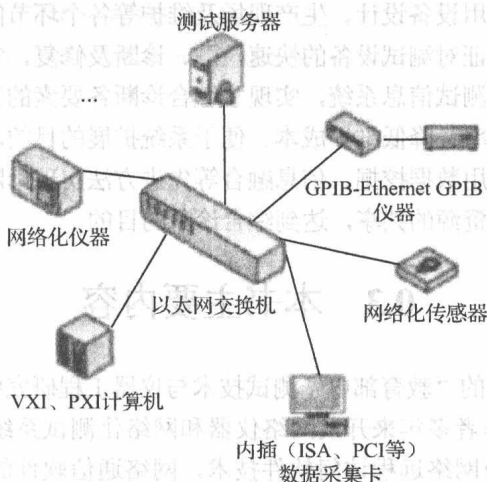


图 0.1 网络化测试系统总体结构

网络化测试系统由三大部分组成：一部分是组成系统的基本功能单元（台式仪器、网络化仪器、网络化传感器、网络化测量模块等）；一部分是连接各基本功能单元的通信网络；另一部分是测试服务器。其中，基本功能单元的作用是获取被测对象的测试数据，并将测试数据经过网络传送到测试服务器和其他指定的基本单元；通信网络的功能是完成网络化测试系统内控制命令、测试数据、工况信息及相关测试参数的传递，并保证不同类型信息传输的不同要求，如一些测试数据需要实时传递等；测试服务器是网络化测试过程中的关键部分，其主要功能是对测试任务进行分配，对基本功能单元采集

来的数据进行计算、处理与综合、数据存储、打印、系统的故障诊断、报警以及通信过程的管理等。

网络化测试是将计算机网络技术引入到测试仪器中,以计算机通信网络作为传输介质,进行数据传输,实现测试资源共享、协调工作。

随着计算机技术、网络化通信技术的不断发展,测量仪器的能力飞速拓展。网络化测试技术不断融合计算机、微电子、网络和通信等领域的最新技术和成果,在理论和实际应用方面均得到了迅速发展,在现代测量中发挥着不可替代的关键作用。目前,网络化测试技术的广泛使用给电力系统、工业测控、交通运输、计量校准、航空航天等领域带来了巨大变化,并逐渐渗透到了国民经济和一切前沿科技领域,为社会带来了巨大的经济效益。

网络化测试技术能够通过网络进行测量和数据采集,可以实现设备的远距离测试和测试设备、测试信息等资源的共享,降低测试系统构建成本,实现了测试系统的高度自动化、智能化。通过实时的仪器测控和数据传输,现代测试系统已经跨越空间限制,能实现远程状态监测和故障诊断。与传统测试仪器相比,网络化测试技术可以随时随地获取所需信息,信息获取速度快,有效性强。

网络化测试技术已经成为设备研制和重大工程中不可或缺的重要组成部分。特别是近些年来,随着世界新技术变革的发展,设备信息化和网络化已经成为提升设备功能的关键因素。以网络为中心的设备测试将测试系统中地域分散的基本功能单元,通过网络互连起来,构成一个分布式的测试系统,将网络化测试技术采集到的数据进行存储、处理和分析,同时以服务的形式通过网络向各种测试和诊断的应用系统提供数据和诊断服务。因此,测试仪器的网络化是实现以网络为中心的设备测试信息系统的前提,而测试信息系统对于实现测试数据、测试资源的共享提供了必要条件。信息化和网络化建设需要不断地提高现有测试设备的网络化支持能力。

网络化测试技术能够通过网络采集访问系统设备的状态信息和故障信息,进行故障诊断分析、远距离诊断和职能维护,既减少了测试人员的工作量,又提高了测试效率,大幅度降低了测试成本,提高了设备功能。它能够充分利用设备设计、生产现场及维护等各个环节的技术的资源,实现测试、维修及诊断信息的快速传输,保证对测试设备的快速检测、诊断及修复,实现设备维修保障的信息化。通过建立以网络为中心的设备测试信息系统,实现了综合诊断各要素的互连、互通和共享,达到降低系统成本、提高测试和诊断效率、降低维护成本、便于系统扩展的目的。通过测试信息系统的网络,可以把各诊断要素链接起来,用数据挖掘、信息融合等先进方法实现诊断知识的获取,从而实现设备系统全寿命周期内测试和诊断资源的共享,达到综合诊断的目的。

0.3 本书主要内容

本书作者在电子科技大学的“教育部电子测试技术与仪器工程研究中心”任职多年,开发了大量网络化仪器。本书主要根据作者多年来开发网络仪器和网络化测试系统的经验,介绍当前比较先进的网络化测试技术,书中涉及网络远程访问软件技术、网络通信软件的开发技术、测量仪器的硬件设计规范技术、高精度网络时钟同步技术、网络发现技术、仪器驱动开发技术、分布式测试系统构建技术等。

本书第1章首先介绍自动测试系统分布式发展趋势,然后着重介绍分布式自动测试系统的体系结构。

第2章和第3章阐述网络TCP/IP协议。

第4章介绍构建分布式自动测试系统中关键的网络化测试技术——LXI仪器的特性与功能。

第5章阐述测试技术中触发与同步技术的重要性,然后着重介绍网络化仪器中IEEE 1588同步技术的设计与实现。

第6章针对网络仪器的开发,主要介绍网络远程访问软件的设计方法。阐述网络发现协议及软件,以及网络化测试技术驱动设计规范和开发。

第7章简单介绍无线网络协议及仪器的开发。

本书工程实用性较强,通过本书的学习,可指导读者快速开发网络仪器或者网络设备,规范设备软硬件设计,进而可以组建分布式测试或设备系统。

参考文献

- [1] Ma Min, Chen Guangju. A new method based on stochastic petri net to task scheduling of parallel test. 北京: 1st International Symposium on Test Automation and Instrumentation, 2006.9.13-2006.9.16.
- [2] 钟世春, 马敏, 王厚军. LXI 仪器中 VXI-11 协议的研究与实现. 成都: 电子科技大学学报, 2010.
- [3] 姜晓琳, 王厚军, 马敏. LXI 标准下的网络 VISA 设计与实现. 北京: 计算机测量与控制, 2010.8.25.
- [4] Lan Jingchuan, Ma Min. Fault Diagnosis Method of Power System Based on the Adaptive Fuzzy Petri Net. 成都: IEEE Circuits and Systems International Conference on Testing and Diagnosis, 2009.4.28-2009.4.29.
- [5] 倪浩然. 量测技术——从 GBIP 到 PXI. 北京: 电气时代, 2004.
- [6] 刘德胜等. 基于 Ethernet 网络化测试系统的组建. 北京: 计算机测量与控制, 2012 20(1): 28-30.
- [7] 万鹏等. 自动测试与 VXI 总线自动测试系统. 济南: 山东大学学报, 1997.
- [8] He, M (He, Min). Research on the Basic Model of Test System with VXIbus. FRONTIERS OF MANUFACTURING SCIENCE AND MEASURING TECHNOLOGY: 53-56, 2015.
- [9] Paton, Kevin. Introducing PXI Instrumentation Into An Existing VXI Based Teste, IEEE Autotestcon: 462-467, 2015.

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化。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。

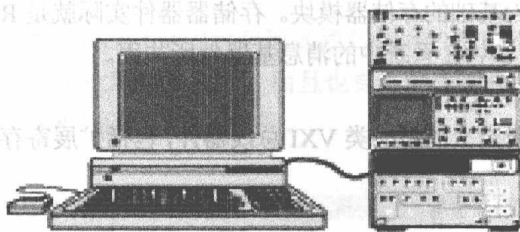


图 1.2 计算机控 GPIB 仪器

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。

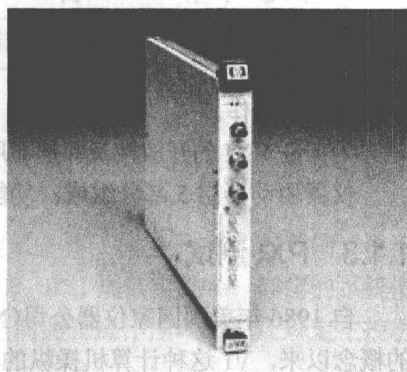


图 1.3 VXI 总线仪器模块实物

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 的开放性及其即插即用的要求,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 and 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,而且也更易于进行系统集成。

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。

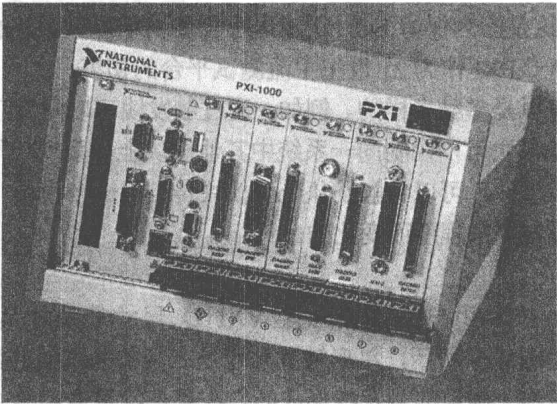


图 1.4 PXI 系统实物照片