Key Technology and Application of
Intelligent Test System Based on Cloud Architecture

基于云架构的智能测试系统关键技术及应用

邓士杰　丁　超　唐力伟
张英波　苏续军　汪　伟　著

北京理工大学出版社
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

基于云架构的智能测试系统关键技术及应用

邓士杰　丁　超　唐力伟
张英波　苏续军　汪　伟　著

北京理工大学出版社
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

版权专有　侵权必究

图书在版编目（CIP）数据

基于云架构的智能测试系统关键技术及应用 / 邓士杰等著. —北京：北京理工大学出版社，2021.3

ISBN 978-7-5682-9617-5

Ⅰ.①基… Ⅱ.①邓… Ⅲ.①自动测试系统-研究 Ⅳ.①TP274

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2021）第 043180 号

出版发行 / 北京理工大学出版社有限责任公司
社　　址 / 北京市海淀区中关村南大街 5 号
邮　　编 / 100081
电　　话 / （010）68914775（总编室）
（010）82562903（教材售后服务热线）
（010）68948351（其他图书服务热线）
网　　址 / http：//www.bitpress.com.cn
经　　销 / 全国各地新华书店
印　　刷 / 北京国马印刷厂
开　　本 / 710 毫米×1000 毫米　1/16
印　　张 / 10　　责任编辑 / 张海丽
字　　数 / 154 千字　　文案编辑 / 张海丽
版　　次 / 2021 年 3 月第 1 版　2021 年 3 月第 1 次印刷　　责任校对 / 周瑞红
定　　价 / 56.00 元　　责任印制 / 李志强

图书出现印装质量问题，请拨打售后服务热线，本社负责调换

前　言

自动测试系统（automatic test system，ATS）在武器装备和工业产品的设计、制造和维护等全寿命周期内起着重要的作用。国内外相关学者和机构在 ATS 标准化、通用化、自动化以及可扩展性等方面取得了一系列成果。

在军用领域，通用测试系统通常采用“通用测试平台 + 专用适配器”的模式构建 ATS。平台具有丰富的测试资源和标准的接口，通过依次更换不同的适配器，可以完成诸多武器装备的综合测试，节约了测试资源。然而在多兵种联合作战条件下的装备保障中，短时间内需面对大量复杂的测试任务，每个测试任务在其测试周期内虽然只利用了部分测试资源，但其在物理结构上会独占平台上所有测试资源，此时闲置资源无法被其他测试任务利用，在现有 ATS 体系架构下很难实现测试资源的有效共享，经常出现测试任务排队现象，制约着快速保障能力的提高。在民用领域，针对大工业时代的批量化生产模式，为保证产品的质量，需不断增加测试项目和工位；为实现快速、准确的质量检测，需在每条生产线配备具有相同测试功能的测试资源，这就造成了测试资源的严重浪费，大大地增加了测试成本。上述两例说明在自动测试技术的发展过程中，随着应用场景和测试需求的变化，测试用户除了关注其标准化、通用化、自动化水平以外，越来越重视测试效率和测试成本的问题。

陆军工程大学石家庄校区兵器测试中心自 20 世纪 90 年代一直专注自动测试技术的研究，经过几代人的努力，在工业生产中的自动化测试以及兵器性能测试与试验方面积累了一些相关的经验，同时该单位也承担了一系列相关的科研项目。笔者于 2006 年加入该团队，开始从事自动测试技术的应用与理论研究，有幸参与了多个与自动测试技术相关的项目，对测试技术也是从懵懂到了解，再到熟悉的过程，在这个过程中也逐渐感觉到对于大规模的测试应用场景，现有的技术架构存在着测试效率和测试资源利用

率偏低及测试成本偏高的问题，这为低成本、高效率的“基于云架构的自动测试技术”的出现提供了适宜的土壤。笔者所在团队提出了“ATS 领域的云测试技术”的概念，对该架构下 ATS 的构建模式和运行模式进行了梳理。

本书是在继承老一辈科研工作者成果的基础上，将笔者在工程实践中对自动测试技术的产生的一些新认识和新感想，以及近几年团队的研究成果加以凝练，终成此稿。本书中借鉴了很多云计算的相关理念，将 TEDS 技术、虚拟化技术以及最优化理论引入 ATS 领域，旨在提高 ATS 的测试效率、降低测试成本，希望对为未来 ATS 的发展提供了一个新思路，抛砖引玉本。

邓士杰完成了第 2 章和第 3 章的撰写工作，丁超完成了第 4 章、第 5 章、第 6 章内容的撰写，唐力伟完成了第 1 章和第 5 章部分内容的撰写，并对全书提出了很多建设性意见，张英波完成第 1 章内容的撰写和全书校对。

栾军英副教授和张礼学博士在全书的撰写过程中给予了无私的帮助，提供了大量宝贵资料和研究成果。

本书由汪伟教授主审，汪教授对本书提出了许多宝贵的修改意见，谨表示衷心的感谢。

本书涉及的研究工作得到了原军械工程学院原始创新基金的支持与资助。同时本书在撰写和出版过程中，得到了陆军工程大学石家庄校区相关领导和同事的关心和指导。北京理工大学出版社领导和责任编辑也给予了热情的帮助和支持。在此，也一并表示感谢！

由于笔者水平有限，且仅对其中涉及的几个问题进行了初步探索，难免有不足之处，真诚欢迎读者批评指正。

邓士杰

目　录

第 1 章　绪论 …… 1

1.1　自动测试系统概述 …… 1

1.2　现有自动测试系统评述 …… 3

1.2.1　早期的自动测试系统 …… 3

1.2.2　近期的自动测试系统 …… 4

1.3　自动测试相关关键技术 …… 4

1.3.1　测试总线技术 …… 4

1.3.2　ATS 软件开发平台 …… 7

1.3.3　面向测试领域的云测试技术 …… 10

1.3.4　其他相关技术 …… 16

1.4　国内保障部门现状 …… 17

第 2 章　云架构自动测试系统体系架构设计 …… 20

2.1　引言 …… 20

2.2　现有自动测试系统分析 …… 20

2.2.1　便携式自动测试系统 …… 20

2.2.2　通用式自动测试系统 …… 21

2.3　云架构智能测试系统整体模型 …… 25

2.4　云架构自动测试系统硬件模型 …… 26

2.4.1　测试服务平台 …… 28

2.4.2　测试服务终端 …… 29

2.4.3　开关拓扑结构 …… 31

2.5　云架构自动测试系统软件模型 …… 35

2.6　云架构自动测试系统运行机制 …… 41

2.7 云架构自动测试系统测试流程 …… 42
2.8 云架构自动测试系统体系架构的优势分析 …… 44
2.9 本章小结 …… 44
第 3 章 基于 TEDS 的智能传感器技术 …… 45
3.1 引言 …… 45
3.2 TEDS 技术概述 …… 45
3.2.1 IEEE1451.4 标准 …… 45
3.2.2 标准化电子数据表格 …… 47
3.2.3 混合模式接口 …… 48
3.3 传统传感器的智能化改造 …… 50
3.3.1 存储器的结构及工作机理研究 …… 51
3.3.2 TEDS 传感器改造电路 …… 53
3.4 TEDS 传感器通信的实现 …… 54
3.4.1 1 – Wire 单总线的工作原理研究 …… 54
3.4.2 1 – Wire 和 RS – 232 协议转换的硬件实现 …… 56
3.4.3 DS2433 的存储器操作命令研究 …… 58
3.4.4 基于 TMEX API 的应用程序开发 …… 58
3.5 本章小结 …… 61
第 4 章 硬件测试资源虚拟化 …… 62
4.1 引言 …… 62
4.2 硬件资源虚拟化概述 …… 63
4.2.1 虚拟化的定义 …… 63
4.2.2 虚拟化的目的 …… 63
4.2.3 虚拟化的意义 …… 63
4.2.4 硬件资源虚拟化典型的模型 …… 64
4.3 硬件测试资源虚拟化模型 …… 65
4.3.1 硬件设备层 …… 67
4.3.2 虚拟资源层 …… 68
4.3.3 虚拟能力层 …… 70
4.3.4 用户层 …… 71
4.4 同态映射机制 …… 72

4.4.1　硬件资源到虚拟资源的映射 …… 73
4.4.2　虚拟资源到虚拟能力构成的映射 …… 73
4.4.3　虚拟能力构成到虚拟能力聚合的映射 …… 74
4.5　实例验证 …… 74
4.5.1　硬件测试资源虚拟化模型 …… 74
4.5.2　同态映射机制 …… 77
4.6　本章小结 …… 78
第5章　动态调度算法 …… 79
5.1　引言 …… 79
5.2　动态调度算法概述 …… 80
5.3　相互间关系复杂的测试任务分解算法 …… 82
5.3.1　任务执行过程和层次结构分析 …… 82
5.3.2　任务分解评估方法研究 …… 84
5.3.3　任务分解过程模型研究 …… 88
5.3.4　实例验证 …… 89
5.4　面向平时的测试资源匹配算法 …… 95
5.4.1　测试描述 …… 95
5.4.2　测试资源匹配原则 …… 96
5.4.3　测试资源匹配算法 …… 99
5.4.4　实例验证 …… 105
5.5　面临突发保障任务的测试任务抢占调度算法 …… 112
5.5.1　测试任务描述 …… 112
5.5.2　测试任务抢占调度算法 …… 115
5.5.3　实例验证 …… 119
5.6　本章小结 …… 123
第6章　云架构自动测试系统应用 …… 124
6.1　引言 …… 124
6.2　原理样机硬件搭建 …… 124
6.2.1　中转器设计 …… 126
6.2.2　开关拓扑结构设计 …… 132
6.3　原理样机软件开发 …… 134

6.3.1 服务器 Server 程序设计 …… 134
6.3.2 客户端 Client 程序设计 …… 137
6.3.3 传感器特征参数完善 …… 140
6.4 原理样机试运行…… 141
6.5 本章小结…… 144
参考文献…… 145

第1章 绪 论

1.1 自动测试系统概述

自动测试（automatic measurement）就是为完成某项测试任务，依托具备一定自动化能力的测量系统进行测量和实验。其中，自动测试技术的前身是20世纪40年代初期的扫频测试技术，通过在局部功能上实现针对内部仪器设备的模拟自动控制，解决了一些人工操作通常难以完成的任务；之后，该方法几经改进，并沿用至今。

随着电子测量技术、自动化控制技术以及电子计算机技术等方法手段的蓬勃发展并不断成熟，融合上述技术的自动测试系统（automatic test system，ATS）朝着高速度、高精度、多功能的方向不断发展。

自动测试系统就是融合了上述相关技术，在尽量少的人为参与的情况下，自动完成针对目标对象的测试任务。

与许多新兴技术的诞生相似，针对ATS的相关研究首先是由于军事上的需要，主要为了解决军队武器装备的测试问题。其中ATS的提出源自20世纪50年代中期美军提出的“万能”自动测试系统概念，并以1956年美国国防部制订的SETE（Secretariat to Electronic Test Equipment Coordination，电子测试设备协调部）计划为开端，开始了针对现代ATS的相关研究[1]。在当时，针对自动测试系统的相关研究最终目标是在不依赖有关技术文献的基础上，通过非熟练工人就能实现系统内部几乎全部仪器设备的自动化操作，并且在电子计算机上快速完成测试，同时通过灵活的编程可以适应并完成所有的测试任务。虽然在当时的技术背景下，这一终极目标远远未能实现，但也取得了不少的技术成就。

在当时的技术背景下，针对自动测试系统相关研究的探索，在贪多求全的“万能”思想指导下，导致所研制出的ATS日益庞大复杂，不仅造价奇高，且系统内部测试功能之间顾此失彼，反倒降低了系统的整体测试性

能。因此致力于有的放矢、专门解决某些测试任务的专用型 ATS 应运而生。

从早期针对具体型号的专用型 ATS 到当前具有极大开放性的通用型 ATS，从专注于测试设备研制到统筹测试系统架构和软、硬件协同开发，ATS 的发展历程大致经历了三代[2-5]。

第一代专用型 ATS，是一款诞生于 20 世纪 60 年代针对具体型号装备的测试系统，具有极强的针对性。当测试相应型号的装备时，专用型 ATS 测试效率高，使用方便、简单，适用于装备类型单一、数量庞大的情况；但受限于早期设计模式，不同类型的专用型 ATS 之间硬件接口和软件标准不统一，相互间关系复杂且没有预留物理上的扩展空间，造成该型 ATS 的通用性、可扩展性以及独立性较差。

第二代模块化 ATS，以美军 1986 年制定的通用自动测试设备为代表，是以控制器（即控制计算机）为核心，依托标准接口总线和各类测试设备组建的测试系统。模块化 ATS 采用新型卡式仪器模块和控制器，通过标准接口总线实现了模块间的连接，增强了硬件设备之间的可互换性和可扩展性；依托控制器以软面板形式显示系统内部所有仪器模块的测试信息和操作按钮，用户只需通过操作软件来控制硬件设备，降低了测试的复杂程度。

第三代虚拟仪器 ATS，该型 ATS 是模块化 ATS 在软件层面的进一步深度优化，以美军 1999 年规划的下一代自动测试系统 NxTestATS 为代表，将现有测试过程中针对仪器设备的复杂操作转换为“鼠标 + 键盘”的简单操作，依托虚拟仪器面板完成测试活动的全过程，提高了具体操作的人性化水平。

相比于国外自动测试系统，国内针对 ATS 的相关研究起步较晚，直到 20 世纪 70 年代中期才开始针对相关领域的初步探索，总体来说，国内发展水平整体落后于西方发达国家[6]。

但经过几十年的国内相关研究人员的不懈探索与实践，尤其是近些年来，围绕新一代 ATS 展开的相关研究在国内各大高校和科研院所陆续展开，加快了国内在相关领域的发展步伐。

目前国内针对 ATS 的研究主要集中在系统体系架构的通用性、可移植性、标准化以及基于新技术对现有 ATS 进行改进上，在理论研究上有了一些突出成果，在实践中也研制出了一些顺应国际潮流的先进 ATS。近些年来，伴随着云计算产业的不断发展，相关的新技术也不断应用于社会生产、

生活的其他领域。本书借鉴云计算的相关理念提出了面向测试领域的云测试技术，并与现有 ATS 相结合，开展了针对云测试环境下 ATS 关键技术的研究，对于解决当前保障部门面临的诸多难题提供了一条新的解决思路。

1.2 现有自动测试系统评述

20 世纪 80 年代开始，西方国家针对通用化的自动测试系统进行持续的人力、物力和财力的投入，由此研制出一系列的具备相当测试能力的自动测试系统。

1.2.1 早期的自动测试系统

首先是早期的自动测试系统，主要诞生于 20 世纪 90 年代中期以前，列举一些已投入使用的具有一定代表性的自动测试系统。

综合自动支持系统（CASS），是由美国海军于 20 世纪 80 年代提出来的，旨在降低自动测试系统的成本并尽量实现自动测试设备的自动化。针对海军武器装备的自动测试需求，CASS 为其提供满足维修保障需求的解决方案。

模块化自动测试设备（MATE），是由美国空军于 20 世纪 80 年代提出来的，旨在降低自动测试系统的成本并为空军现有的各类自动测试设备进行规范，以实现测试设备采购、开发、维护等一系列操作的标准化。

集成测试设备（IFTE），是由美国陆军提出来的，旨在为陆军装备的现场测试提供可靠的自动测试设备。

计算机化的自动机（CAM）是由美国通用汽车公司研制的一套综合性测试系统，旨在提供一套应用于维修车间的能够进行各类自动化测试的系统。

通用测试站（CTS），是由美国海军于 20 世纪 90 年代提出来的，具体研制的单位是美国的休斯公司，主要针对海军装备的制导武器进行自动测试，针对 CASS 难以满足的测试需求进行扩展、深化。

除了上述列出的自动测试系统外，在西方一些国家也成功开发出了一些其他类型的各具特色的自动测试系统。例如，英国国防部开发的低成本可扩展的自动测试设备 LCDATE、美国波音公司开发的 ATS－195、法国宇航公司的 ATEC 系列等。

1.2.2 近期的自动测试系统

虽然早期的自动测试系统都采用了通用化的测试平台，但在实际应用中仍然无法适应众多待测设备的相关需求。其主要表现在：一是此类所谓的通用自动测试系统通常只针对某一类或某一系列装备进行针对性测试；二是此类 ATS 的相关研制工作总是被列入相应装备平台项目的规划之中，不可避免会带有相应装备测试相关的特性；三是不同类型的 ATS 之间的交互操作性较差。

针对早期通用自动测试系统在实际应用中存在的诸多不足，进一步降低自动测试系统，尤其是军用 ATS 的相关成本，美国国防部率先提出了关于下一代自动测试系统的体系结构，即 NxTestATS。建立在该标准上的自动测试系统采用开放式系统测试理念，受到 IEEE（电气和电子工程师协会）P1226 和 VXI Plug & Play（VPP）两个工业标准的支持，在测试信息系统和分布式测试方面，分别遵循 IEEE P1232 和 TCP/IP（传输控制协议/网际协议）的支持。

立足早期的自动测试系统，分析其不足和局限，着眼于近期国外更先进的自动测试系统，结合国内部队各保障部门现状，进行深入总结和归纳，以探索出一条符合自身发展、实际的自动测试系统的研制路线。

1.3 自动测试相关关键技术

1.3.1 测试总线技术

测试总线是指计算机与测试仪器构成的测试系统内部以及相互之间信息传递的公共通路，是现代检测系统的重要组成部分。测试总线的选择是 ATS 硬件设计的重要环节，它决定着整个系统的测试性能，它的发展推动着自动测试系统的更新换代。采用先进的测试总线技术，易于实现硬件平台的标准化、通用化，从而大大简化系统硬件平台的结构，增加系统的开放性、兼容性、可靠性和可维护性，提高测试速度和测试精度。

测试总线技术随着工业生产的需要以及高新科技的发展在国外发展很快，20 世纪 70 年代出现 GPIB（通用接口总线），到 80 年代就出现了 VXI（VME bus eXtension for instrumentation，用于仪器的 VME 总线扩展）总线，在 90 年

代，PCI（外设组件互连）总线成为主流产品。随后美国 NI 公司又在 1997 年 9 月推出模块化仪器的主流平台 PXI（PCI eXtensions for instrumentation，PCI 在仪器领域的扩展），这是与 compact PCI 完全兼容的系统。这种虚拟仪器模块化主流平台 PXI/compact PCI 的传输速度已经达到 100 Mb/s。

伴随着检测系统的发展和基于自动测试的需求，测试总线在近几十年来发展极为迅速，从专用接口到通用接口的演变，从早期的 GPIB、CAMAC（计算机自动测量和控制）到近期的 VXI、MXI（多系统扩展接口）、PCI/PXI、CAN（控制器域网）、PCIe（高速串行计算机扩展总线）/PXIe、MMS、LXI（基于局域网的模块化测试平台标准）、IEEE1394（Firewire）、USB（通用串行总线）等测试总线。这些测试总线虽然出现先后次序不同，但它们各有各的特点和优势，每种测试总线都占有一定的市场。以下是在组建各种测试系统时常用到的总线系统。

1. PC – DAQ 系统

PC – DAQ 是以数据采集卡、信号调理电路和计算机为仪器硬件平台组成的插卡式虚拟仪器系统。采用 PCI 或 ISA（工业标准体系）计算机本身的总线，将数据采集卡/板（DAQ）插入计算机的空槽中即可。PCI 总线插卡式测试仪器系统是 20 世纪 90 年代个人计算机（PC）广泛应用的结果。基于 PCI 总线的测试系统拥有成熟的硬件基础、广泛的软件支持、大批熟练的用户以及低廉的价格，其灵活性使得基于 PCI 总线的测试仪器成为基于计算机仪器的重要发展方向。但是，受 PC 体系结构的限制，PCI 总线插卡式测试仪器在可扩展性和精确测试控制方面存在不足。

2. GPIB 系统

GPIB 是 20 世纪 70 年代初由美国 HP 公司提出的一种通用数据并行总线，即 IEEE488 标准。其采用母线连接方式，可支持 15 台器件同时工作，数据传输距离不超过 20 m。其独有的三线挂钩机制提高了数据传输的可靠性，但其数传速度较低，最高只有 1 Mb/s。由于目前的台式仪器一般都备有 GPIB 接口，技术成熟，且价格相当便宜，因此 GPIB 仍然拥有相当可观的市场和用户，特别是在微波频段对测试准确度要求高，而对测试要求相对不高的场所。

3. VXI 总线

VXI 总线是 VME（Versa Module Eurocard）总线在仪器领域的扩展。该

总线是“用于仪器的 VME 总线扩展”的简称，VXI 吸取了 VME 总线和 GPIB 的一些优点，是一种即插即用式的、完全开放的、适合多厂商环境的模块化仪器总线标准。VXI 总线模块有 A、B、C、D 四种尺寸，其中 D 尺寸模块除装有 P1、P2 连接器外，还装有 P3 连接器。在 P3 上定义了一个由两条星形线组成的星形触发系统。同时为了满足测控模块的需要，VXI 总线通过 P1 连接器提供了 16 MHz 的系统时钟，通过 P2 连接器提供了 10 MHz 的时钟信号、TTL（逻辑门电路）及 ECL（发射极耦合逻辑）电路触发总线、模拟相加总线和 12 引脚的局部总线。它具有良好的交互操作性、可靠性及可移动性，其传输速率高、功耗低、体积小、重量轻，便于维修。

VXI 总线 1.4 版本被批准为 IEEE－1155 标准，成为开放式工业标准。VXI 标准和 VPP 规范的建立使模块仪器走上了标准化的道路，为自动测试技术的发展提供了新的技术支持。已经有 1 000 多家生产厂家生产各种 VXI 产品，VXI 的应用范围越来越大。但这类总线价格比较昂贵，适用于中大型的测试设备。在美国，VXI 测试系统已经被应用到车载、机载机动测试中，如 F－22 战斗机的生产测试过程。

4. PXI 总线

PXI 是 PCI 在仪器领域的扩展，是一种全新的开放式、模块化仪器总线规范。PXI 分别采用了 compact PCI 的外形及机械特征、标准 PCI 的电气特征，将标准 PCI 规范电气特征与 compact PCI 采用的欧式卡和 IEC（International Electrotechnical Committee，国际电工委员会）高性能连接器相结合，定义了触发机制、局部总线、系统时钟等功能，满足了仪器应用中高性能和特殊要求。同时，还定义了一种虚拟仪器软件结构（virtual instruments software architecture，VISA），VISA 主要用于模块定位及与串口、VXI、GPIB 等外围模块相互通信。它比 VXI 有着更高的传输速率，填补了低价位 PC 系统与高价位 GPIB 系统和 VXI 系统之间的空白，是搭建现代自动检测系统首选的硬件平台。

5. LXI 总线

LXI 总线是基于工业标准以太网（Ethernet）技术，扩展仪器需要的语言、命令、协议等内容，构成适用于自动测试系统的新一代模块化仪器平台标准总线。它集 Ethernet 标准、Internet 工具、LAN（局域网）协议、IEC 物理尺寸和 IVI（interchangeable virtual instruments，可互换虚拟仪器）驱动程序等各方优点于一身，使测试系统的互连平台转向更高速的 PC 标准 I/O

(输入/输出)，而不需要机箱和昂贵的电缆，并可使用标准的软件。与 VXI 和 PXI 机箱背板总线结构不同，LXI 实际上以以太网为总线，因此 LXI 模块能储存在世界任何地方，或从世界任何地方访问，这就极大提高了它的使用范围，其具体设想是将非常成熟的以太网技术应用到自动测试系统中，以替代传统的测试总线技术。LXI 总线技术是下一代总线技术的发展方向，但是现在支持该总线的硬件还少，与其他总线的兼容性还有待进一步验证。

6. 其他测试总线

IEEE1394、USB、RS232 等总线，它们的电气特性决定了不能作为大型系统的总线，但是在组建小型测试系统上应用得非常广泛；同时一些总线(如 GPIB) 由于技术成熟、价格低廉，在对总线的要求不高的检测系统中仍在使用。

LXI 总线无疑是下一代测试总线的发展方向，不久的将来，会成为测控领域的主流总线。但是因为 LXI 总线是基于以太网的通信方式，以太网本身还存在一些缺陷，如需要人工配置 IP（互联网协议）地址，如何解决 IP 地址的冲突问题等；再者，数据传递的实时性、数据的完整性和安全性等都是需要进一步探讨的问题，所以 LXI 总线目前主要是针对美国军方的一些高端装备测试系统，还没有在工业界及其他国家装备测试系统中得到普及。PXI 总线和 VXI 总线可以说各有其优缺点，VXI 总线从整体的性能上来说要优于 PXI 总线，这就使得 VXI 总线系统价格昂贵，在传输速度和价格方面，PXI 总线比 VXI 总线传输速度快、硬件成本低。VXI 总线在早期的测试系统中被广泛地使用，随着 PXI 总线标准的公布和产品的推广，几乎所有的测试系统开始使用这种机械性能、电气性能良好，软件规范兼容性强的总线，PXI 总线同虚拟仪器技术结合起来已经成为当今组建大型综合测试系统的首选。

1.3.2 ATS 软件开发平台

1. 面向过程软件开发平台

早期检测系统测试软件的开发是面向过程的，主要是利用各种非可视化的编程语言直接开发，如 BASIC、FORTRAN、C 语言等。由于当时计算机技术水平的限制，这些早期的测试软件主要是在 DOS（磁盘操作系统）平台下开发的，开发效率低下，软件复用方式主要是调用过程库或函数库中自己定义的函数，所以用这些语言开发出的测试软件实现的功能单一、结构简单，大部分是一些程序代码，对程序开发人员的要求很低，这一时

期的软件系统也只是硬件的一种附属品。

2. 面向对象软件开发平台

随着计算机技术和面向对象技术的发展，出现了各种高级的可视化的面向对象的软件开发平台，如 Visual C + + 、Visual Basic、Delphi 等，这些平台为用户提供了可视化的编程环境和一些现成的控件，不仅减少了他们的工作量，而且工程技术人员也可以编制较为复杂的测试软件，同时面向对象方法和技术的应用在一定程度上提高了软件的复用性和可维护性[7-9]。

但是这些软件平台的数据处理和分析功能很弱，有的甚至没有信号处理方面的函数库或工具包，对多种总线及仪器驱动的支持也不是太好，这样就要求开发者必须编写大量的代码实现领域专用的功能模块，对应用开发者要求也较高，开发者既要有专业的背景知识，又要掌握专业的软件技术，开发一个新的系统仍然需要付出很大的努力。对于开发一个较为复杂的检测系统软件来说，在这些平台上开发的效率显然不能满足开发者的需要。

3. 面向信号软件开发平台

20 世纪 70 年代出现的通用测试语言（abbreviated test language for all systems，ATLAS）是一种面向信号的语言，描述的是测试信号的特性。ATLAS 编写的测试程序，主要用于描述需要解决的问题，避免了指定解决问题的具体方法，根据规范进行编写的测试程序具有标准的程序架构、语法格式、参数含义，同时测试程序具有可移植性，能够被重复使用。该语言已在模拟测试、数据总线测试、数字测试、光电测试、燃气涡轮发动机测试、惯性导航系统测试、导航系统测试、定时和同步、视频测试等诸多测试领域内具有测试规范。ATLAS 的最大优势是只要有合适的资源，使用者就可以自由地在不同的测试系统中移植它们的 TPS（test program sets，测试程序集），避免资源的浪费。目前国际上比较成功的 ATLAS 开发环境主要有美国 TYX 公司的 PAWS 和法国宇航公司的 SMART[10-12]。我国对 ATLAS 的跟踪和研究刚刚起步，加紧研制我国自己的 ATLAS 开发平台，将 ATLAS 尽早地应用于自动测试领域是值得我们研究的新课题，军械学院的孟晨教授在这方面做了一些初步的研究，开发了一种面向功能接口的测试语言——测试流程描述语言（test flow description language，TPDL）及其开发平台[13]。

虽然基于 ATLAS 的软件开发平台具有上述的众多优点，但它的使用存在很多限制，这是因为其存在下列不足[14-15]：①将 ATLAS 程序转化为计算