

一种便携式低成本通用并行测试设备研制

卢宁波, 齐亮, 姜泽伟

(北京机电工程研究所 综合保障技术研究中心, 北京 100074)

摘要: 为解决传统装备维修保障体系一对一测试环节效率低、成本高的缺点, 满足现代保障体系对自动化、高效化、便携化的不断需求, 研发新型并行测试软件平台、多核多线程并行管理技术, 并依托“三化”、便携、柔性设计研制一种基于CPCI总线的并行测试设备; 经验证, 低成本、小型化、资源高度集成前提下设计开发的各功能组件以及多核多线程集群管理技术的优化使用, 使得该设备拥有便携、高性价比、1~4台装备隔离高效并行自动测试、多装备通用等显著优势, 大幅提升测试效率至400%、缩短复杂武器装备各阶段全流程周期, 并锐减75%的人力、设备、环境资源投入, 测试结果、原始数据的实时在线存储、智能判读及曲线回放亦突出显示了该设备故障诊断性能的卓越性。

关键词: 便携式; 低成本; 通用; 并行自动测试

Design of a Portable Low-cost Universal Parallel Test Equipment

Lu Ningbo, Qi Liang, Jiang Zewei

(Beijing Institute of Mechanical and Electronic Engineering, Beijing 100074, China)

Abstract: In order to solve the low-efficiency and high-cost of traditional one-to-one weapon maintenance support system and meet the needs of modern security system for automation, high-efficiency and portable pursuit, this thesis develops a new parallel testing software platform, a new kind of multi-core multi-thread parallel management technology and special function modules. Further, a portable parallel test equipment based on CPCI bus is developed in view of three-way design, portability design and flexible design. After a large number of tests, verification and optimization of low-cost, miniaturized, resources highly integrated modules and multi-core multi-thread cluster management technology, this portable, cost-effective, 1-4 products high-efficiency parallel testing, multi-product universal automatic test system (ATS) become more robust and owns better performance. It can significantly improve test efficiency to 400% and directly reduce 75% manpower, equipment, environmental resources. Real-time online storage of test flow results, intelligent interpretation, and curve playback highlight the outstanding performance of this ATS.

Keywords: portable; low-cost; universal; parallel automatic test system

0 引言

自动测试系统(ATS, automatic test system)作为各型装备技术阵地保障系统, 通常具备被测对象(unit under test, UUT)所需的全部仪器仪表资源、激励信号, 主要实现对UUT的自动测量与数据处理, 包括状态实时监测、性能考核、智能诊断、风险评估、数据回放与输出等^[1-3]。现行武器装备测试系统尤其是批量生产线测试环节仍主要采用传统一对一测试模式, 仅能通过不断增投测试设备以配合保障大批量复杂装备的研制工作, 该方式在导致成本大幅增加的同时, 却并不能显著提升装备研制效率, 投入产出比难以适应当代国防领域对成本、效率、保障能力的高要求。

随着信息化战争作战强度大、消耗大、技术含量高、机动性强、速决性强等特点被逐渐认知, 如何高效地完成保障任务、提高武器装备战备完好性, 已成为近些年各国装备建设中关注的重要问题。由于传统测试设备一对一的测试模式直接限制了武器系统批量生产线、技术阵地保障

的工作效率, 已不能满足当今高技术武器装备规模的不断扩大及装备保障需求的持续快速增长, 且机柜式的设计方案使得传统测试设备在成本控制、机动性等方面毫无优势可言^[4]。因此, 装备保障体系对一种低成本、便携、通用、多台/套产品并行自动测试设备的需求变得迫在眉睫。

本文设计的基于CPCI总线便携式并行测试设备在严格控制成本的前提下大幅提升了单机测试设备的便携性能, 令单兵操作批量维护保障成为可能, 同时1~4台装备同步并行自动测试的实现从根本上解决传统批量生产线、保障体系中测试环节成本高、效率低的问题, 在各个试验环节大幅提升测试效率的同时极大减少人力资源的投入。此外, 由于资源种类、数量预留丰富, 该设备亦具备多型装备通用的突出优势。

1 系统结构及原理

1.1 设计目标

测试设备作为武器系统二级维护设备, 是军事作战及装备综合保障中的重要一环, 在武器装备研制、定型、部队使用等各阶段完成对装备功能、性能测试以及其它技术准备任务, 测试设备的可靠性、保障能力对于减少武器装备检测与维护时间、提高作战机动性与灵活性、快速适应

收稿日期: 2020-07-07; 修回日期: 2020-07-20。

作者简介: 卢宁波(1988-), 男, 北京人, 硕士, 工程师, 主要从事武器装备并行测试、小型通用化相关领域方向的研究。

未来军事斗争的挑战有着重要意义^[5]。

为彻底解决传统机柜式测试设备、测试模式的弊端,提升测试设备性能并满足单兵操作、多型共用、灵活高效、价格低廉、保障能力突出等需求,本文设计的新型测试设备具备如下功能及特点:

- 1) 三化程度高、资源丰富,测试覆盖率高;
- 2) 柔性设计,使用灵活、通用性强、具备一定扩展能力;
- 3) 软硬件支持多套装备隔离并行测试,互不干扰;
- 4) 测试数据实时智能判读,故障诊断性能优越;
- 5) 整机尺寸小、重量轻,配合高强度包装箱,便于单兵操作;
- 6) 总线架构成熟且成本低廉,执行效能优势突出;
- 7) 人机界面友好、使用便捷、质量稳定可靠、保障能力强。

1.2 总线选型

目前测试领域公认技术成熟且被广泛使用的常见总线类型有 VXI、PXI、CPCI。

VXI: 基于 VMEbus, 利用通用接口实现各仪器仪表功能, 提升系统集成度的同时促进了成本、系统体积在一定程度上控制, 曾在 20 世纪末与 21 世纪初得以推广, 但因其无法保障终端客户对主流软件的使用需求以及依旧高昂的成本与有限的性能, 近年来逐渐在高端应用测试领域被 PXI、CPCI 总线替代。

CPCI: 快速成长的工业总线架构之一, 采用广受欢迎的 PCI 接口, 并且将这个接口涵盖在一个较小且坚固的套件内。最显著的改变就是 Eurocard 标准化装置规格, 可容纳 8 个插槽, 改善了现存的 PCI 技术, 并为工业运算提供了更为坚固、更好执行效能的解决方案。

PXI: 建立在 CPCI 核心规格上, 定义了更多的机构、软件以及电气方面的需求, 广泛应用于测量及自动化工业领域中。PXI 与 CPCI 批次之间具有交换兼容性, 但 PXI 受制于工业应用要求, 相对 CPCI 价格明显昂贵许多。

综上, PXI 与 CPCI 均拥有较为明显的性能优势, 但结合本并行测试设备低成本及各项使用需求的设计目标, 本设备选用性价比更高的 CPCI 总线。

1.3 系统架构

本设备采用异构体系、标准底板与新研两型多功能复合板卡相结合的设计思路, 硬件资源集成度更高, 同时可以保障设备的小型化、轻量化。加固机箱配专用接口板组成自动测试设备主机, 该架构中主板、功能板及总线底板通过稳定性非常高的针孔连接器以及导轨结构固定, 自身具有非常高的可靠性, 在抗振动冲击、防氧化等方面具有良好的效果, 同时加固箱既是仪器设备箱又可兼顾一定程度包装箱的作用, 箱体由强化材料制成, 配置减震机构, 具有良好的减震和密封性能, 搬运方便。整个测试设备非常容易展开和撤收, 更便于运输和机动保障。

测试设备前主机板选用凌华 CPCI-6940, 后主板选用

凌华 CPCI-R6002, 为整套测试系统提供强有力的 8 核中央处理器及 2 个 Gbe、1 个 COM、2 个 USB3.0 接口。总线底板选用标准 6U CPCI 总线底板, 1 个系统插槽放置主机板, 7 个外设插槽放置两型复合板卡。CPCI 机箱供电电源选用 1U 模块电源, 额定功率为 300W。两型复合板从后走线板走线, 机箱内通过线缆把板上信号接入机箱侧壁航插上。机箱内提供 4 路电源模块, 同时设计一个继电器板控制电源输出, 继电器板接入主板 RS232 端口控制, 主机结构关系如图 1 所示。

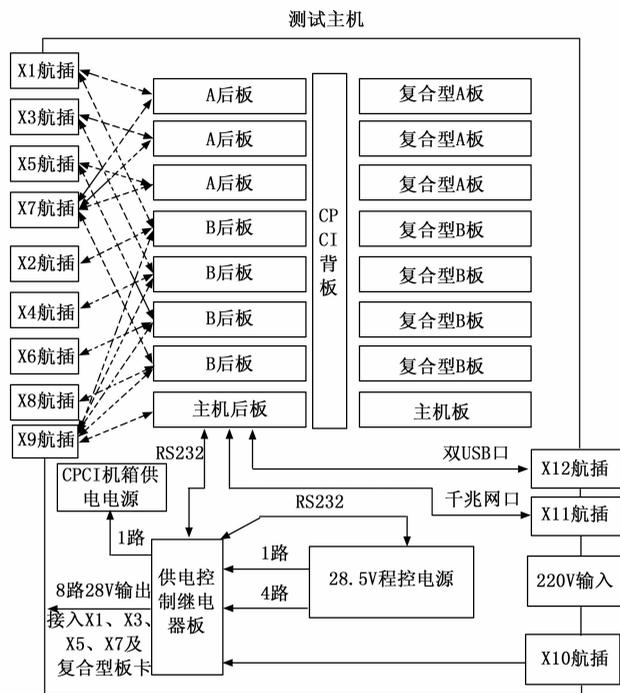


图 1 设备主机结构关系图

为达到装备共用、资源丰富、测试覆盖率高为目的, 结合武器装备测试领域实际需求, A、B 两型复合板卡应尽可能多地具备常见采集、激励、数字通讯等资源, 如 DI、DO、AD、DA、CAN、1553B、RS422、LVDS、以太网等。

为实现设备各测试通道隔离、独立的并行测试并规避某通道意外故障时导致的通道间相互干扰, 设计采用的 3 块 A 型复合板与 4 块 B 型复合板进行了资源分组与组间物理隔离, 所有硬件资源均等分配于 4 个独立的测试通道。为便于客户端的使用便捷并简化软件设计复杂度, 此处引入“虚拟板卡”设计思路, 即在 4 块 B 型板卡自然分组并隔离提供给 4 个测试通道的同时, 将 3 块 A 型板卡虚拟为 4 块板卡并通过底层软件设计实现上位机软件的无差别调用, 如此实现 4 个并行测试通道软硬件接口的使用一致性。

2 系统硬件设计

2.1 机箱结构

基于便携性设计, 严格控制主机箱体积并保证散热性能, 选用定制机箱, 尽可能压缩体积与重量。主机箱具备

如下特点：

- 1) 机箱主体采用铝镁合金型材，表面喷涂可自定义；
- 2) 便携机箱采用下翻键盘的设计，安装 17 寸 LCD 显示器；
- 3) CPCI 背板垂直安装在机箱内，板卡由机箱左侧垂直插入机箱，板卡插入后利用外侧安装面板进行遮挡；
- 4) 220V 模块电源及用户电源依次安装背板后部；
- 5) 机箱右侧设计电源输入插座、开关和 IO 接口，并根据用户的要求设计其他接口；
- 6) 机箱内部安装监控模块，监控风扇和各路电压的工作状态，监控显示屏显示；
- 7) 机箱上部两侧设计提手，方便搬运；
- 8) 机箱的键盘设计橡胶包角，机箱整体安装橡胶垫脚，有利于对机箱的减震和保护；机箱和背板支持后 IO 插卡。

主机箱外观如图 2 所示。

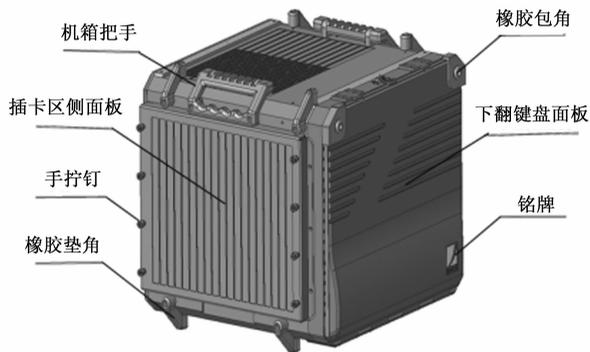


图 2 设备主机箱外观示意图

2.2 A 型复合板卡

A 型复合板卡采用 Xilinx 公司的 A7 系列芯片 XC7A100T-2FGG484 作为控制单元，主要完成测试设备主机和被检对象之间的数据采集，实现了 DI、DO、AD 与 DA 等功能。各类型资源至少被分为隔离的 2 组，其中 1 组分配给第 4 块 A 型“虚拟板卡”调用。A 型复合板卡采用 CPCI-6U 板卡结构，其功能如图 3 所示。

开关量信号输入 (DI) 接口采用 FAIRCHILD 公司的 HCPL0631 作为主要芯片。HCPL0631 光耦合器由一个 Al-GaAs LED 组成的高速集成光检测器逻辑门。HCPL0631 输出由 CMOS 工艺上的双极晶体管组成，以降低功耗。温度参数保证在 -40~+85℃ 的温度范围内。最大输入信号为 5 mA 将提供最小输出接收电流为 13 mA。内部噪声屏蔽提供优越的共模抑制。

开关量信号输出 (DO) 接口采用 AXICON 公司的 IM03T 作为主要芯片。采用微型双刀双掷继电器，拥有较长的设计使用寿命，负载电流可达 2 A，负载电压可承受 250 V 交流、220 V 直流，相比同类其他公司产品优势明显。

模拟量信号输入采集 (AD) 主要芯片为 AD7656 (ADI 公司 16bit 高精度 ADC)，输入采集频率最高可达 12 MHz、

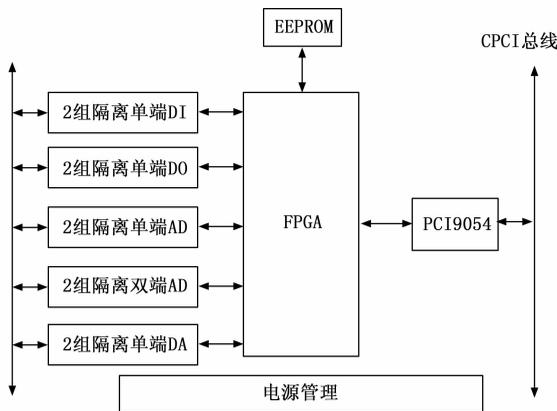


图 3 A 型复合板卡功能框图

吞吐率可达 250 kbps，可实现三路 ADC 的同步独立采集，同时为各型 MPU、DSP 提供高速串口、并口以实现数据交互。

模拟量信号输出接口 (DA) 主要芯片为 AD5764 (ADI 公司 16bit 高精度 DAC)，芯片供电电压为 ±11.4 ~ ±16.5 V。四通道串行输入、双极性电压输出，满量程标称输出电压范围 ±10 V，可通过串口进行编程控制。

电阻测量接口主要芯片为 AD7610 (ADI 公司 16bit 高精度芯片)，采集范围、工作模式串口可控。通过内部电路设计将采集的电阻信号转为电压信号，由芯片对电压信号进行采集测量，最终根据测量结果通过软件计算得出实际电阻值。

2.3 B 型复合板卡

B 型复合板卡采用 Xilinx 公司的 K7 系列芯片 XC7K325T-FFG900 作为控制单元，主要完成测试设备主机和被检对象之间的通信，实现了 CAN、RS422、1553B 及 LVDS 功能，同时在板卡的空余位置额外扩展预留了一组 DO 作为备用资源。设备选用 4 块 B 型复合板卡，每块板卡单独被各自测试通道调用。B 型复合板卡同样采用 CPCI-6U 板卡结构，其功能如图 4 所示。

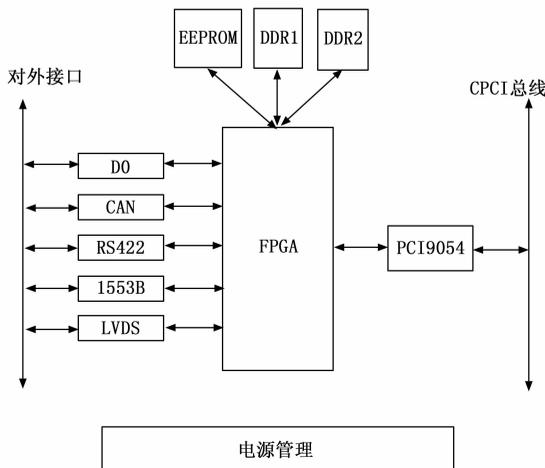


图 4 B 型复合板卡功能框图

开关量信号输出 (DO) 与 A 型复合板卡设计方案一致, 均采用 AXICON 公司的 IM03T 作为主要芯片, 工作可靠稳定。

CAN 总线采用 PHILIPS 公司的 SJA1000T 作为主要芯片。SJA1000T 是一款独立 CAN 总线控制器, 多用于汽车和通用领域的局域网工业环境, 其在 BASIC CAN 模式的基础上, 提供了一种新的操作模式—PeliCAN 模式, 支持 CAN2.0B 的新特性协议规范。支持 11bit 标识符和 29bit 标识符, 位码率高达 1 Mbps, PeliCAN 模式下支持读写介入的错误计数、可编程的错误警告门限、最新误码寄存器等功能。

RS422 总线采用 MAXIM 公司的 MAX3160EAP 作为主要芯片。MAX3160 是可编程的 RS232/485/422 多协议收发机, 引脚可配置为 2Tx/2Rx RS232 接口或单个 RS485/422 收发器。斜率限制使 EMI 最小化并减少由不当端接的电缆引起的反射, 允许高达 250 kbps 的无差错数据传输, 禁用旋转速率限制, 允许设备在 RS485/422 模式下以高达 10 Mbps 的数据速率传输, 并具有 1A 关机特性模式、短路限制和热停机防止过度损耗电缆。

1553B 总线采用 HOLT 公司的 HI-1573 作为主要收发处理芯片。HI-1573 是一款基于 CMOS 工艺设计的低功耗双冗余 MIL-STD-1553 标准的收发处理器。每个通道的发射机部分采用互补的 CMOS/TTL 数字输入数据, 将其转换为适于驱动总线隔离变压器的双曼彻斯特码 1553 信号, 为每个发射机提供独立的发射机抑制控制信号。HI-1573 系列数据传送器包含差分源驱动发送器和差分接收器, 被广泛应用于 MIL-STD-1553 A/B 标准的数据总线, 该器件在传输过程中产生梯形输出波形。

LVDS 总线采用 MAXIM 公司的 MAX9218 作为接收芯片, 采用 MAX9247 作为发送芯片。MAX9218 是数字视频串并转换器, 在数据阶段, LVDS 串行输入被转换为 18 位并行视频数据, 相位输入被转换为 9 位并行控制数据, MAX9247 为数字视频并行并串转换器, 对串行接口进行编码和多路复用。与 MAX9218 搭配使用, 完成对视频数据的串并转换、并串转换。两款芯片的 ESD 静电放电容限均为 ±10 KV 接触放电与 ±30 KV 空气放电。

2.4 程控电源

采用内置机箱结构形式, 位于测试设备主机内后部, 电源输入为标准 AC 220V, 输出 4 路直流电压值可通过软件调节, 程控电源前面板分别如图 5、6 所示。

程控电源 4 路直流电压输出通过供电控制继电器被分为 8 路, 每 2 路为 1 组供一个测试通道使用, 4 组 8 路输出电压组间隔离、组内不隔离, 由主机板通过 RS232 程序控制每路通断状态。

为满足不同被测对象对直流供电的特殊需求 (如特殊额定电压、电流等), 本便携式低成本通用并行测试设备航插侧壁设计有直流供电输入接口, 可通过供电控制继电器板将提供给被测对象的直流供电由测试设备内部电源转为

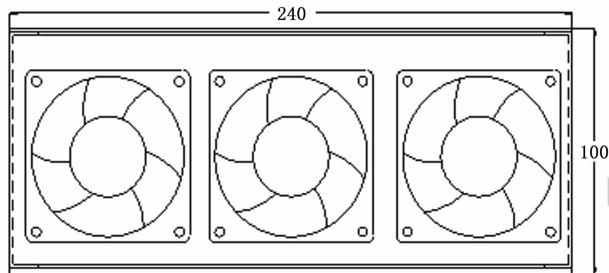


图 5 程控电源前面板示意图

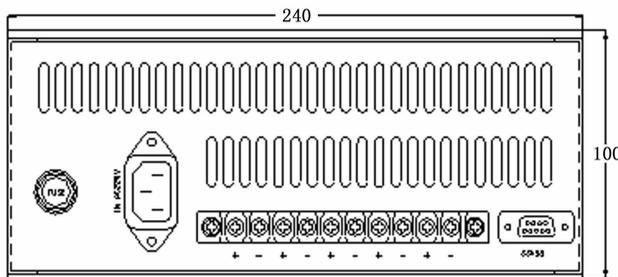


图 6 程控电源后面板示意图

来自测试设备外部输入接口的供电。控制板选用 SONGLE 继电器, 型号 SLA-24VDC-C-30A, 继电器典型电压为 24 V, 供电为 28 V, 可通过 10 A 电流, 其原理如图 7 所示。

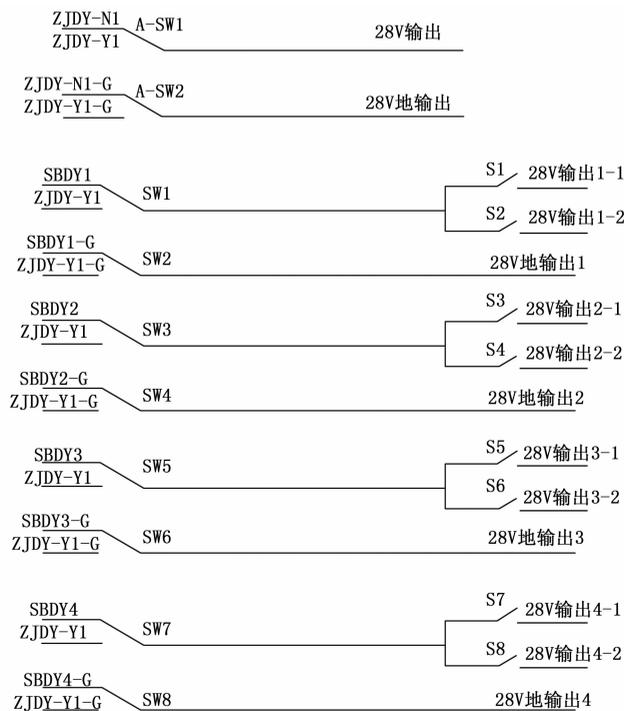


图 7 供电控制继电器板原理图

2.5 接口方案

从图 1 的设备主机连接关系可知, 本便携式低成本通用并行测试设备主机设置 12 个对外连接插座, 分别定义为

X1~X12, 各连接器型号及功能分配如表 1 所示。

表 1 便携式测试设备主机对外接口

代号	型号	插座名称
X1	JY27468T21F35PN	1 通道数据采集接口
X2	JY27468T17F42PN	1 通道通信接口
X3	JY27468T21F35PN	2 通道数据采集接口
X4	JY27468T17F42PN	2 通道通信接口
X5	JY27468T21F35PN	3 通道数据采集接口
X6	JY27468T17F42PN	3 通道通信接口
X7	JY27468T21F35PN	4 通道数据采集接口
X8	JY27468T17F42PN	4 通道通信接口
X9	J599/20FF18PFN	LVDS 通信接口
X10	J599/20FF05PN-H	外接直流电源接口
X11	YW120F01S1	RJ45 连接器
X12	CT55B-4Z-03	双 USB 口插座

3 系统软件设计

3.1 软件结构

随着单核处理器功耗、散热缺陷的日益突出, 仅靠提升主频来提升 CPU 性能的方式逐步被 Intel、AMD 等供应商抛弃^[6], 处理器的专项研发重点由高频逐渐转向多核。多核处理器可以实现单位时间内处理性能明显提升的同时, 保持在相对低功耗与低散热状态, 其应用环境也愈加广泛^[7-8]。

通过分析对比处理器高频与多核的优缺点、结合当前处理器发展现状, 并依据武器装备快速检测需求开展并行测试软件设计, 开发基于多核 CPU 的新型多线程并行检测技术。通过专用并行测试软件设计, 合理分配 CPU “核” 与线程的绑定关系, 在减少系统资源时空开销的同时, 提高 cache 利用率, 更好地实现程序静态负载平衡, 保证程序多线程间并发进行, 建立高加速系数并行测试平台, 研发多核多线程并行管理技术并形成新型并行测试专用函数模块, 同时将并行测试过程中常见的线程 starvation、cache 扑空、convoying 效应、线程阻塞、时间片强制等待^[9-11]等问题一并彻底解决, 保证了产品软件设计质量, 并成功避免并行测试设备实际使用过程中由于上述问题导致的研产任务中断。上下位机软件结构如图 8 所示。

3.2 新型并行测试通用软件平台

通用平台软件开发于中文版 WINDOWS 7 操作系统, 以 VC6.0 作为开发平台, 采用测试流程与软件程序分离的方式开发, 平台具有与被测对象无关的特点, 只有装备测试流程库直接与被测对象相关, 软件设计时根据测试流程填写专用测试流程库, 可由不同的开发人员根据同一规则同时填写。

并行测试通用软件平台对传统的通用软件平台架构完成重新搭建, 为实现高效、并行、多型装备混合编制测试任务, 新研平台绑定四个不同的测试流程库, 分别执行对应的测试序列, 通过线程绑定与 WINDOWS 动态分配相结合的策略规避并行测试过程中常见的平台资源抢占与数据篡改问题。

3.3 专用函数模块

测试流程为测试软件设计的核心内容, 每一个测试任务对应一组测试流程。在通用并行测试软件平台基础上进行二次开发, 加载专用的测试序列及相应的函数库, 就能完成对相关测试任务, 实现测试程序与测试任务的分离, 如图 9 所示。

测试执行时, 测试执行程序根据读取测试流程库中的内容进行测试动作, 测试序列执行完毕就表征完成一项测试任务。

测试流程库中各专用函数功能模块的开发将依据被测对象的有关测试项目、技术参数和测试保障深度等内容进行。

3.4 多核多线程并行管理技术

多核多线程并行管理技术的核心在于, 将多核处理器处理的并行测试任务分解, 利用 SetThreadAffinityMask 函

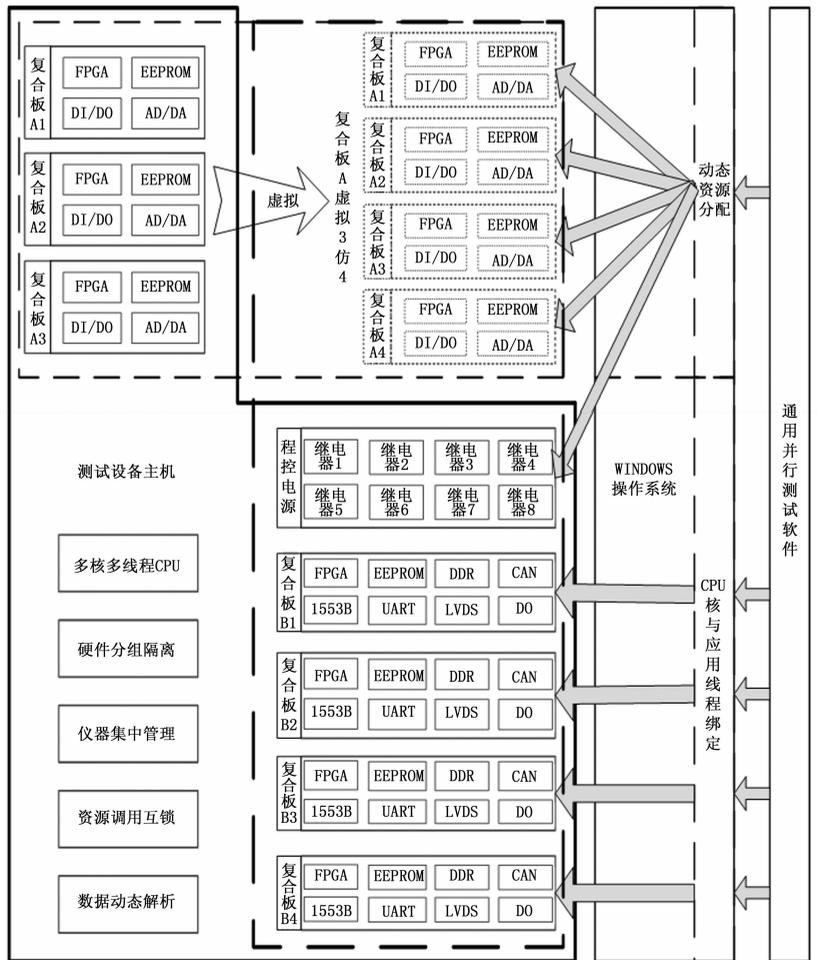


图 8 软件结构示意图

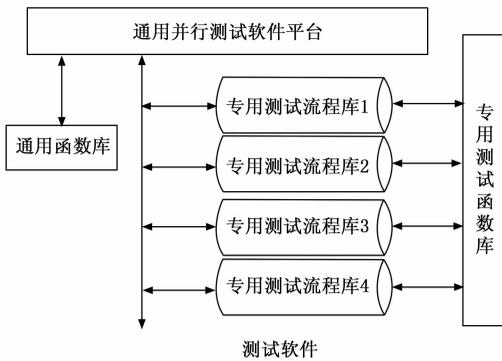


图 9 测试程序开发模式示意图

数开发“核绑定”技术并将处理器的 1—N 个核心与多组并行执行的测试任务主线程分别物理绑定, 绑定的处理器核心数 N 可以由多项并行测试任务均分, 也可以根据各项测试任务的复杂程度进行自由支配, 即指定图 9 测试程序开发模式中的专用测试流程库主线程分别关联特定的处理器核心, 并按照相应的测试序列完成对多个被测单元的隔离、独立并行测试。

多核多线程并行管理技术工作原理为:

- 1) 线程创建、“核绑定”、统一初始化待使用仪器资源;
- 2) 同步并行测试时利用信号量完成多线程统一触发;
- 3) 并行测试任务按既定流程完成对被测对象的通讯、激励、采集、数据整理、实时判读;
- 4) 利用临界段、内核变量实现共享数据的访问互斥;
- 5) 测试结束后多线程软硬件资源完全释放。

该管理技术在“核绑定”的同时, 对资源消耗相对随

机、不固定的任务采用 WINDOWS 动态自适应分配策略。由此可见, 该管理技术的关键为测试任务的静态分解、硬件资源的合理分配与绑定。多任务并行同步测试原理如图 10 所示。

针对多线程并行测试最常见的共享数据篡改问题, 合理采取互锁函数 (InterlockedExchangeAdd 等)、临界段 (EnterCriticalSection、LeaveCriticalSection 等)、互斥量 (CreateMutex、WaitForSingleObject、ReleaseMutex) 等策略完成互斥访问与数据保护, 同时应减少用户态程序对内核对象访问时产生的时空开销、系统开销。

4 实验结果与分析

本文研制的便携式低成本通用并行测试设备配备底部带滑轮的防水、防尘、抗摔、防腐蚀、耐高温聚丙烯复合树脂材料包装箱后, 为二级维护技术阵地单兵便携操作提供了有力条件。针对某被测装备开发专用测试函数模块, 并依托新研通用并行测试软件平台灌装于本设备, 完成 1—4 台被测装备大量总装对接并行测试验证后交付该被测装备批量生产线, 经过生产线长期、充分、频繁实际使用考核, 测试设备功能、性能稳定可靠。

历次试验的正确执行充分证明:

- 1) 采用 CPCI 总线架构在大幅压缩设备成本的前提下仍然能够提供优异的执行效能;
- 2) 异构体系与 8 槽标准 6U CPCI 总线底板结合, 通过合理布局、元器件选型严格控制设备体积与重量, 实现便携性单兵操作;
- 3) 软件平台与被测对象无关、硬件平台资源丰富可扩展, 仅通过更换测试电缆即可实现多型被测对象通用, 灵活性强;

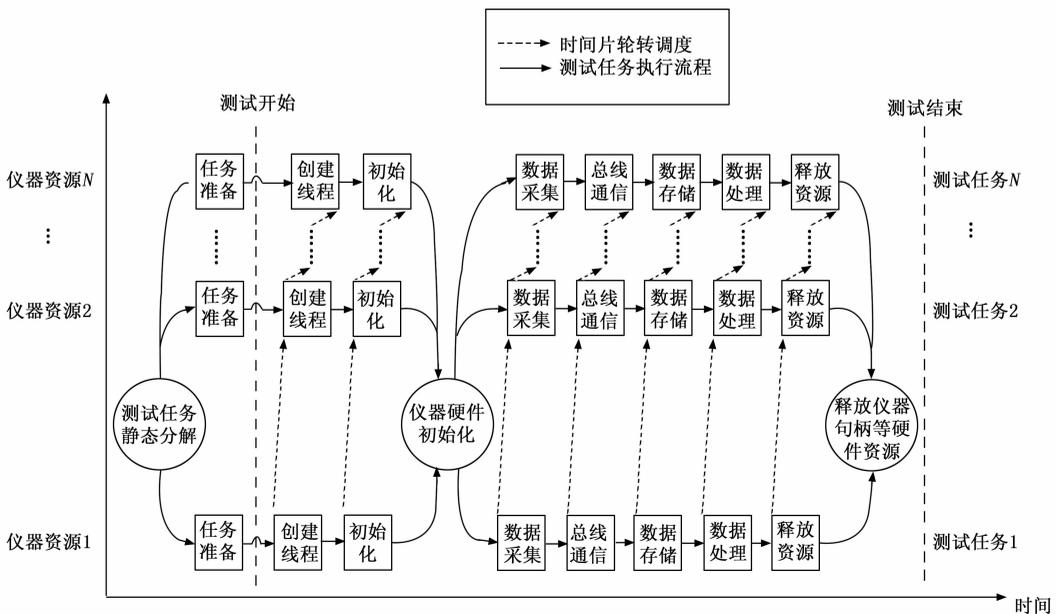


图 10 多任务并行测试工作原理图