

# 基于 PXI 某处理器模块 ATE 设备的设计与实现

曹兴冈, 赵斌

(中国航空计算技术研究所, 西安 710068)

**摘要:** 随着测试技术的飞速发展, 高性能、高性价比的 PXI 测试技术平台应运而生, 为了提升产品自动化测试效率, 将其应用于处理器模块综合自动测试设备 (ATE) 的软、硬系统结构设计, 其采用模块化、标准化思想, 以 PXI 测试技术标准平台为核心, 系统软件配合各硬件模块和信号接口模块, 既可以某个参数单项测试, 也可全项目参数测试, 测试覆盖率 95% 以上, 测试完成按照定义格式系统自动存储测试结果; 被测试产品功能、性能正常, 投入使用效果良好, 并为 PXI 测试平台应用于 ATE 设备提供应用实践平台, 具有普遍的通用性及广泛的推广性。

**关键词:** PXI 平台; ATE 设计; 计量校准

## Design and Realization of Processor Module ATE Based on PXI Platform

Cao Xinggang, Zhao Bin

(Aeronautics Computing Technique Institute, Xi'an 710068, China)

**Abstract:** With the rapid development of test technology, high performance and cost-effective PXI test platform came into being. To improve the efficiency of automated product testing, apply it to the soft and hard system structure design of a processor module integrated automatic test equipment (ATE). It adopts modular and standardized ideas, and takes the PXI test technology standard platform as the core. System software cooperating with each hardware module and signal interface module, can't only test a single parameter but also all parameters of a project, and more than the test coverage rate of 95%. After the test is completed, the system automatically stores the test structure according to the defined format. As a result the function and performance of the tested product are normal, and the effect of putting into use is good. It will provide a practice chance for the application of PXI test platforms into ATE, which has general universality and extensive promotion.

**Keywords:** PXI platform; Automatic Testing Equipment (ATE) design; measure and calibration

## 0 引言

随着电子技术与计算机技术的飞速发展, 以总线技术为基础的自动测试系统 (ATS)<sup>[1]</sup> 已逐步成为处理器产品可靠运行的重要保障。测试总线应用于测试与测量领域内, 它是构成一个自动测试系统的核心, 其技术进展决定着整个 ATS 技术的发展方向。

自 20 世纪 70 年代 GPIB 总线以 IEEE 488 标准为名发布以来, 测试总线标准已经快速发展, 其间先后出现了 GPIB、VXI、PXI、PXIe、LXI、AXIe 等测试总线标准<sup>[2]</sup>, 其不断推陈出新的发展历程推动着整个测量与控制领域发生了巨大变化。

基于 PXI 总线技术综合优势, 某处理器模块测试平台优先选用 PXI 平台。本文重点介绍基于 PXI 平台某处理机模块 ATE 设备, 主要包括系统结构、测试方法、软件结

构、计量校准等。

## 1 系统结构

ATE 设备的所有组件集成在 19 标准机柜内。包括主控机、PXI 机箱 (包含功能板卡)、接口适配箱、模块适配器、程控直流电源等。系统电源带有限压、限流功能, 并带有过压、过流保护功能, 在系统设计时也增加了回路的过压、过流保护功能<sup>[3]</sup>, 支持程控上下电、电压电流回读等, 保证系统和被测件的安全可靠。

系统软件配合各硬件模块和信号接口模块, 既可以针对某个参数测试, 也可完成全部参数的测试。测试完成后, 系统自动存储测试结果, 并根据用户的需要生成指定格式 (Excel 或 Word 等) 的测试报表。系统结构示意图如图 1 所示。

## 2 系统硬件设计

重点对某处理器模块中地信号处理、供电电源、直流模拟信号、离散量信号、DPRAM 模块、数字逻辑模块、串口通讯及适配器等硬件接口进行介绍。

### 2.1 模块地信号处理

处理器模块接口母板上 +15 VGND、-15 VGND、28

收稿日期: 2019-12-04; 修回日期: 2020-01-06。

基金项目: 航空基金项目 (2006ZC31002)。

作者简介: 曹兴冈 (1977-), 男, 陕西户县人, 高级工程师, 主要从事计算机应用方向的研究。

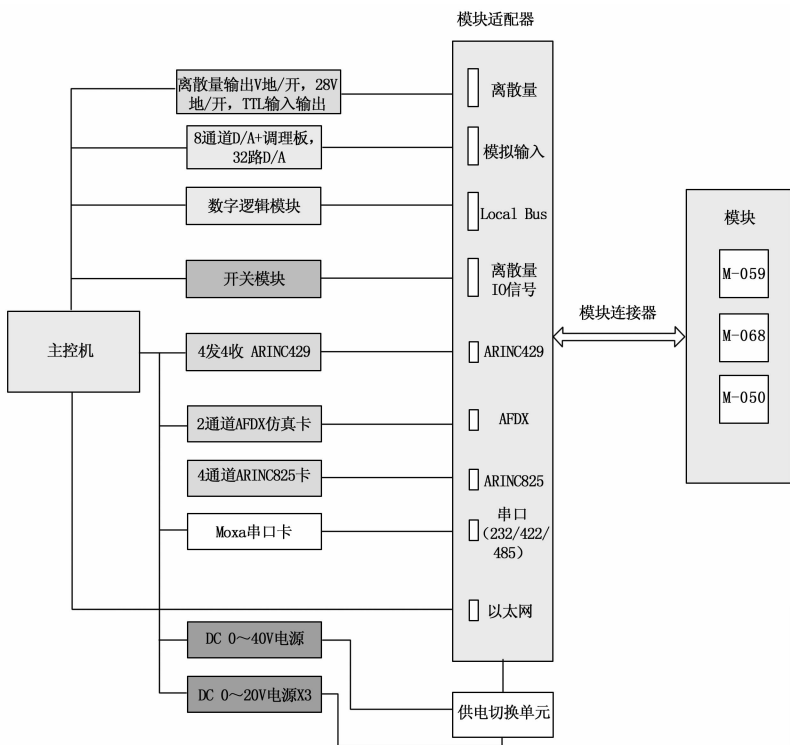


图 1 系统结构示意图

VGND 和 GND (5 V) 分开设置, 分隔间距  $\geq 30$  mil。内层负片分割时, 划分的区域与表层一样。地和电源不允许跨越相对应的区域内。需要连接的地之间采用磁珠或 0 欧姆电阻相连, 实现一点接地, 电源和地采用独立层, 减少对信号的干扰。

### 2.2 供电电源

通过一台模块化电源: 三块 0~20 V/5 A 和一块 0~40 V/2.5 A 直流电源, 结合数字信号控制功率开关完成给被测件供电, 电源可以软件控制上、下电。功能实现框图如图 2 所示。

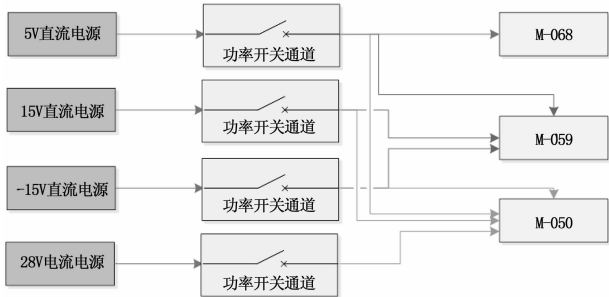


图 2 供电电源接口功能框图

处理器模块电源的供电采用互斥设计, 保证在测试时只有一台电源对 UUT 供电。同时根据模块的供电需求, 测试软件设定相应的过压、过流保护。

选用的功率开关的性能指标为: 60 VDC, 10 A。

电源供电技术参数:

- 1) +5 V: 5 V 电源, 电流  $< 2.4$  A;

- 2) +15 V: 15 V 电源, 电流  $< 0.1$  A;

- 3) -15 V: -15 V 电源, 电流  $< 0.1$  A;

- 4) +28 V: +18 ~ +32 V 电源, 电流  $< 0.1$  A。

### 2.3 直流模拟信号

ATE 设备配置 2 块 D/A 板卡。一块带有 12 路 14 位输出通道, 每个通道能够输出  $-10 \sim +10$  V 的模拟电压信号, 经调理板调理后, 能够完成给 UUT 28 V (通道有效测量参数范围 18~32 VDC) 四路、5 V (通道有效测量参数范围 1~20 VDC) 二路、15 V (通道有效测量参数范围 1~20 VDC) 二路、-15 V (通道有效测量参数范围  $-20$  V ~  $-1$  VDC) 二路直流输入通道电压信号; 带有 32 路 14 位输出通道, 直接输出至 30 路  $\pm 10$  V 模拟量输入通道, 完成测试。直流模拟信号功能实现框图如图 3 所示。

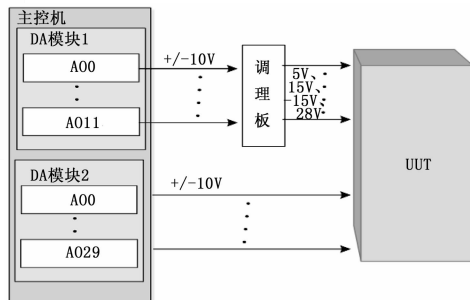


图 3 直流模拟信号连接电路示意图

### 2.4 离散量输入信号连接电路

UUT 离散量输入信号 (针对 UUT) 包括“5 V/地”信号、“地/开”和“28 V/开”离散量信号。“5 V/地”信号由数字输入输出模块实现。“地/开”和“28 V/开”离散量信号由离散量输出模块实现。输出离散量信号的板卡是通过 RS485 串口控制的信号开关板卡<sup>[4]</sup>, 继电器切换响应时间小于 20 ms, 系统能够在 25 ms 之内发出离散量信号。

通过测试内部的 RS-485 总线控制信号开关模块输出结合 UUT 的地端口 (0 V) 电压信号完成给被测设备提供“地/开”离散量信号。离散量输入信号连接电路示意图如图 4 所示。

信号开关器件指标为: 30 VDC, 0.5 A; 带载使用寿命  $> 100\ 000$  次。

- 1) 接地/开路输入 34 路, 其中地信号: 测量激励电流 2~3 mA 时, 电压不大于 3.5 VDC, 开信号: 通道电压 30 VDC 时, 漏电流不超过 100  $\mu$ A;

- 2) 28 V/开路输入 32 路, 其中 28 VDC 信号: 测量激励电流 2~3 mA 时, 最低识别电压为 16 VDC, 开信号: 30 VDC 时, 漏电流不超过 100  $\mu$ A;

### 2.5 离散量输出 (相对 UUT) 信号连接电路

数字量输入模块卡的 30 V 离散量隔离数字采集通道, 能够采集 UUT 的地/开离散量信号和 28 V/开离散量信

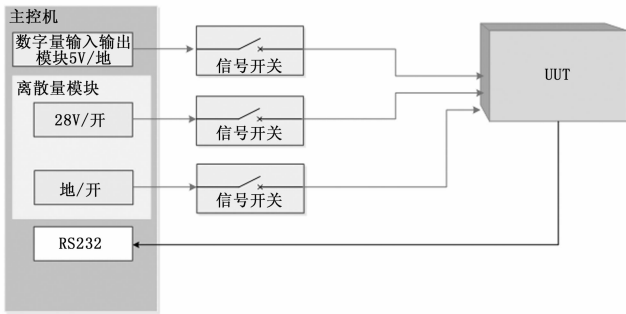


图 4 离散量输入信号连接电路示意图

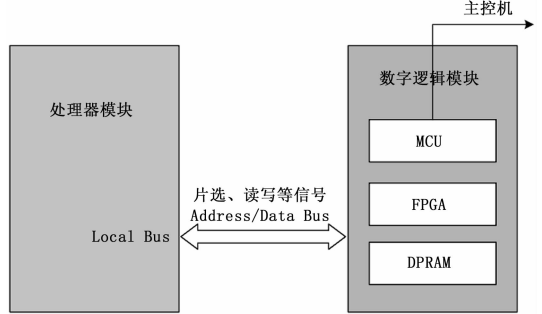


图 7 Local Bus 测试连接示意图

号<sup>[5]</sup>；离散量信号采集连接电路示意图如图 5 所示。

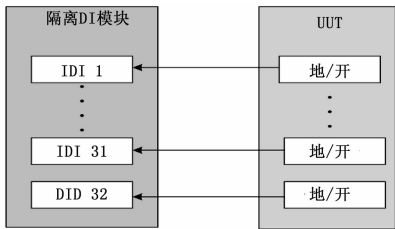


图 5 离散量输出信号连接电路

数字量输入模块的隔离采集端口具有：输入通道高隔离电压（2 500 VDC）；高过压保护（50 V）；有效输入范围宽（5~30 V）。并具有双向导通能力，即使信号反接依然不会损坏板卡。此模块还提供系统离散量自检功能。

### 2.6 DPRAM 模块

ATE 设备提供 DPRAM 模块，模块按照接口处理板上功能设计，提供 3 片 IDT7024 DPRAM，电平为 TTL（+5 V）。因此，接口电路除控制 DPRAM 读写外，还需要对电平进行转换。处理器模块通过片选信号选择不同的 DPRAM 进行读写操作，操作完成后，ATE 设备通过 DPRAM 模块上内置的 MCU 将 UUT 选定的芯片对应地址的数据读出并与预期值比对。DPRAM 连接图见图 6。

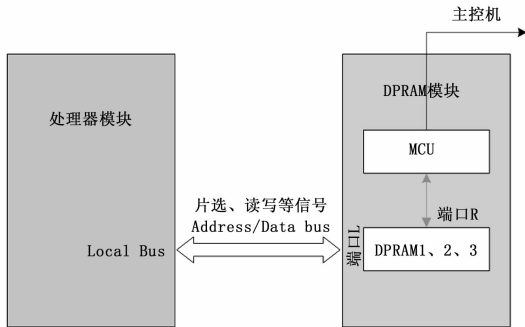


图 6 DPRAM 接口测试连接示意图

### 2.7 数字逻辑模块

数字逻辑模块仿真 Local Bus 总线<sup>[6]</sup>信号，作为处理器模块的外部设备。处理器访问局部总线时可对数字逻辑模块上的存储单元进行读写。ATE 设备通过串口获取相关存储单元数据并判断处理模块读写是否正常。测试连接示意图见图 7。

### 2.8 串口通讯连接关系

一个串口模块由 8 路串口组成，其中每一路可通过拨码开关完成 RS232、RS422、RS485 间的转换，最大速率 115 200 bps，实现和 UUT 的串口通讯。串口连接关系如图 8 所示。

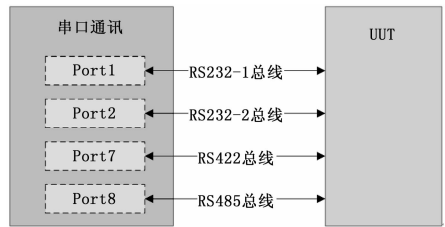


图 8 串口连接示意图

### 2.9 适配器方案

ATE 设备配置适配箱+模块适配器实现 UUT 信号的转接和调理。适配箱后面板通过连接器连接 ATE 设备端的各输入输出通道和台式设备，经过各个调理模块后通过连接电缆把各个测试接口引出，与模块适配器连接。

适配箱前面板有测试孔，可满足用户在测试时测量各个信号状态的需求。模块适配器通过模块连接器与被测件相连，将需要测试的端口和信号引出，并通过电缆与接口适配箱连接。

### 3 选用的 PXI 平台主要硬件配置及优良特性

基于 PXI 平台<sup>[7]</sup>处理器模块 ATE 设备硬件配置及优良特性：PXI 机箱选用 PXI-1044 型 14 槽机箱，温度范围为 0~55 ℃，采用标准化设计，支持 PXI2.2 版标准；19 寸标准机柜，采用强制风冷设计，达到良好的散热效果。

ATE 设备采用程控模块化电源给 UUT（被测件）供电，共计 4 个模块，其中 0~20 V/5 A 三块，0~40 V/2.5 A 一块，支持程控上下电、电压电流回读等，满足处理器模块供电的需要。

64 路数字 I/O 模块实现数字量的输入输出检测。

采用 Moxa 八通道多功能串口卡（每个通道均可设置为 RS232、RS422、RS485）实现 RS232、RS422、RS485 接口的通信测试。

采用双通道 ARINC825D 板卡实现 ARINC825D 数据总线测试。

采用双通道 AIM AFDX 或所内生产的 AFDX 仿真卡实现 AFDX 总线端系统的通信及相关测试。

采用 4 发 4 收 ARINC429 板卡实现 ARINC429 数据总线的通信测试。

采用 12 路 D/A 模块配合信号调理板(将 D/A 输出的  $\pm 10\text{ V}$  调理至  $\pm 32\text{ V}$ )实现  $28\text{ V}$ ,  $+15\text{ V}$ ,  $-15\text{ V}$  模拟量输入通道的测试。

采用 32 路 D/A, 输出  $\pm 10\text{ V}$  电压满足 30 路  $\pm 10\text{ V}$  模拟量输入通道的测试;

采用定制的数字逻辑模块实现对 LBE 总线的仿真, 实现 LBE 总线地址、数据、片选、读写等信号的时序逻辑测试。

三块 32 路离散量模块和两块 32 路开关模块实现  $28\text{ V}/$  开离散量、地/开信号的测试。

数字万用表实现系统的自校准和相关电压的测试。

测试系统通过仪器面板接口和适配器完成输入输出信号的切换和供电, 将 UUT(被测件)通过适配底板和系统连接起来, 形成一个完整的测试系统。

## 4 测试项及测试方法

### 4.1 BIT 测试

处理器模块上电后, ATE 设备从串口获取模块 BIT<sup>[8]</sup> 信息并显示。

需要单独对处理器模块其中一项进行测试时, 通过串口发送 BIT 测试项指令并回读测试结果显示。

### 4.2 电源测试及拉偏测试

电源测试包括: 模块上各种电源电压测量等。采用开关模块配合数字表测量电压, 并对其进行记录。

ATE 设备获取数字表测试结果, 解析后在用户界面显示并记录。

将 UUT 供电电压拉偏至 UUT 供电需求的上、下限, 并完成 UUT 相关的 BIT、I/O 端口测试、通讯测试等全部测试是否合格, ATE 设备将测试结果通过软件界面显示出来, 并记录形成测试报告。

### 4.3 离散量测试

通过数字量输入输出模块、离散量输出模块输出离散量信号, 给指定通道置位(逻辑 1 或 0), 通过串口回读该通道的状态值并比对, 显示结果。

### 4.4 直流模拟量输入采集测试

通过模拟量输出 D/A 模块给指定模拟量输入通道输出设定电平值, 处理器模块采集该通道电平值后上报给 ATE 设备, ATE 设备比对结果并显示。

### 4.5 ARINC825 数据总线通信测试

ATE 设备通过 ARINC825 板卡给处理器模块响应的 ARINC825 通道发送数据, 波特率设置为  $100\text{ kbps}$ , 处理器模块收到数据后回传给 ATE 设备, ATE 设备收到数据后比对并显示结果。

### 4.6 ARINC429 数据总线通信测试

ATE 设备通过 ARINC429 板卡给处理器模块响应的

ARINC429 通道发送数据, 波特率设置为  $100\text{ kbps}$ , 处理器模块收到数据后回传给 ATE 设备, ATE 设备收到数据后比对并显示结果。

### 4.7 AFDX 端系统测试

为了测试 AFDX 终端系统网络通信的性能、功能以及协议符合性, 一个终端节点通过网线连接到 AFDX 仿真模块, 主要完成终端系统的功能测试、协议符合性测试以及性能测试。

以基本帧为例的接收测试方法如下:

1) ATE 设备创建发送端口配置表、发送 VL 配置表、接收端口配置表、接收 VL 配置表以及端系统配置表, 然后通知端系统进行加载;

2) ATE 设备将其速率设置为  $100\text{ Mbps}$ , 然后构造 100 帧数据, 将其发给终端系统;

3) 终端系统收到数据帧后用发送端口将其收到的数据返回给 ATE 设备; 验证 ATE 设备的相应端口接收到相应数目的有效数据帧。

### 4.8 DPRAM 接口测试

处理器模块读写 ATE 设备提供的 DPRAM 接口模块, 读写完成后, ATE 设备通过串口读取相应芯片及地址的数据并与预期值比对, 确认处理器模块能否正确读写 DPRAM。

### 4.9 Local Bus 总线测试

数字逻辑模块仿真 Local Bus 总线信号, 作为处理器模块的外部设备。处理器访问局部总线时可对数字逻辑模块上的存储单元进行读写。ATE 设备通过串口获取相关存储单元数据并判断处理模块读写是否正常。

### 4.10 以太网接口集成测试

以太网接口通过主控机以太网接口与集成 ATE 设备进行数据通信, 采用 ping 命令进行通信。

ATE 设备将测试结果通过软件界面显示出来, 并记录形成测试报告。

### 4.11 串行通信接口

RS-232、RS-422、RS-485 串行通讯接口, 采用 8 路的多功能串口卡, 数据收发正常。ATE 设备将测试结果通过软件界面显示出来, 并记录形成测试报告。

### 4.12 功耗测试

模块上电后, 通过串口回读程控电源的直流电压、电流数据, 并计算和检查测试结果, 得出模块的功耗并记录。

## 5 系统自校准和计量

系统校准采用原位计量校准, 预留测试接口, 减少拆装。使用适配器引出系统测量资源测试点, 使用外部校准设备对其进行计量。需要提供的资源包含: 六位半数字万用表一台。

计量时采用经过校准的数字万用表检测 ATE 设备的输出模拟信号, 根据在量程范围内的测试结果对输出通道进行标校; 数字通道采用回绕测试的方法进行计量。

在校准时, 主要针对 ATE 设备所需要的指标校准, 校准的精度不低于  $5\%$ 。在系统校准时, 通过系统预留的校准

接口, 将需校准的模块的测试通道通过电缆与标校仪器设备相连, 按照使用标准源比对的计量方式即可完成对系统中各个接口的计量。系统计量示意图见图 9。

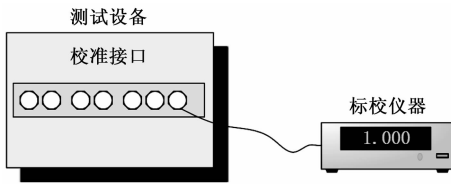


图 9 系统计量示意图

## 6 软件设计

### 6.1 测试软件组成

软件是处理器模块通用 ATE 设备的主要部分, 将设备中每个模块的功能有机结合, 并使整个设备的运作有效稳定。ATE 设备应用软件组成如图 10 所示。测试操作系统选择主流的成熟稳定的 Windows 7 系统, LabVIEW 提供了直观的图形显示界面, 使开发的应用程序具有良好的人机界面, 方便用户操作。整个系统软件包括: 硬件配置模块、系统自检模块、参数设置模块、UUT 识别模块、模式选择模块、单元测试模块、数据处理模块、报表生成模块和在线帮助模块<sup>[9]</sup>。

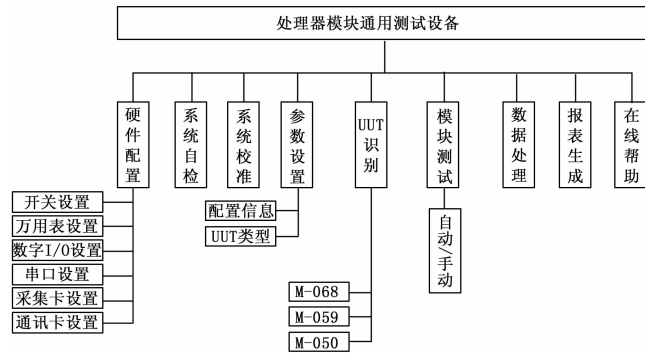


图 10 ATE 设备软件组成框图

该软件由两大部分组成, 第一部分是由按钮组成, 包括“系统自检”、“系统校准”、“UUT 识别”、“模块测试”、“报表输出”和“退出”等按钮。软件把操作员常用到的功能都放到桌面上; 另一部分则是菜单项, 一些不常用到的附加功能则放到菜单中, 如“读取/保存配置文件”等文件操作功能。“自动手动测试”选择项放到“模式选择”菜单项。在线帮助也放到菜单中。

### 6.2 测试流程

用户使用软件进行测试的总体流程如图 11 所示。在运行模块测试软件后, 对系统中的硬件进行初始化配置。在测试之前, 首先要对设备中需要的测试模块进行自检, 保证 ATE 设备自身状态正常。然后确认被测件 UUT 工作准备状态是否正常, 进行手动/自动模式选择, 开始执行测试与数据结果处理。在执行测试过程中, 当测试项不合格时, 测试系统通过出错对话框、出错状态指示灯提醒操作人员

及时进行故障处理。

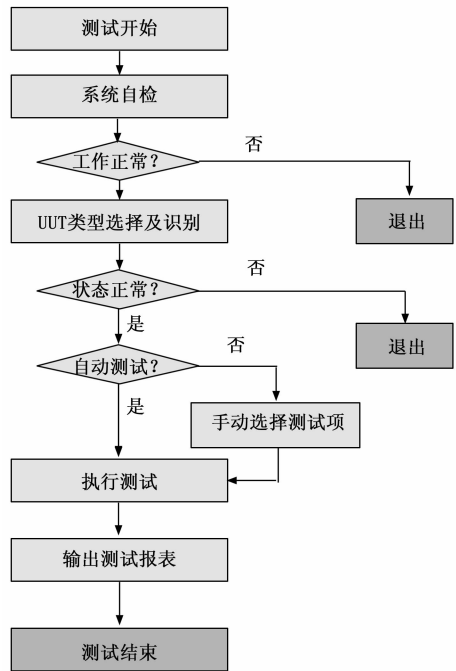


图 11 测试软件总体流程

测试完成后, 系统软件能够对测试结果分析统计、合格项判定, 测试结果以测试报告的形式输出, 方便用户查阅和打印。

在实现此测试任务的过程中, 主要包括:

- 1) 系统自检功能: 主要是通过调用程控模块的测试函数来检测模块是否能上电后正常工作。
- 2) 系统校准功能: 主要是通过给系统输入标准数字、模拟信号, 然后采集信号来判断测试系统是否能正常工作。
- 3) UUT 类型选择: 该模块负责检测被测件的类型, 通过用户设定的 UUT 类型匹配硬件设置, 进行 UUT 设备的加电操作。
- 4) 参数设置功能: 包括硬件参数的设置, 即对采集通道采样率, 量程等的设置; 还包括测试参数判据的设置, 即对测试结果合格与否的阈值设置, 测试系统根据设定的阈值自动判定测试结果; 另外还有手动和自动测试模式选择。
- 5) 模块测试功能: 模块各个测试项的测试。
- 6) 报表输出功能: 输出 word 或 excel 格式的测试结果。
- 7) 在线帮助功能: 提供系统的在线使用方法。

以上多个功能结合、结合其它的质量要求而形成了测试工作的功能、性能、可靠安全性要求, 达到能完整测试处理器模块性能的综合指标测试任务要求。

## 7 试验结果与分析

基于 PXI 平台某处理器模块 ATE 设备已经成功完成与被测件 UUT 及外部互联设备联试, 设备技术指标满足协议要求, 测试覆盖率 95% 以上, 被测件 UUT 经过 ESS、高低温工作、功能振动等试验测试验证, 其功能、性能满足应

用要求,装机使用正常。

## 8 结束语

基于PXI平台某处理器模块ATE设备设计与实现,以先进的PXI测试平台为核心,其硬件系统结构设计采用模块化、标准化原则,通用性及推广性强。利用LabVIEW软件,配合NI的标准软硬件产品,系统开发周期短,并具有良好的可扩展性和可移植性。在充分考虑自动化测试效率及测试覆盖率同时,配置自身计量校准功能,其通用性、先进性可广泛应用于航空航天电子产品及设备功能、性能测试等领域。

### 参考文献:

- [1] 严乐,司斌,张从霞,等. 美军自动测试系统的现代化发展综述 [J]. 航空兵器, 2016 (2): 71-76.  
 [2] 朱利文,于雷,金传喜. 测试总线的发展与展望 [J]. 现代防

御技术, 2019, 47 (1): 151-161.

- [3] 於二军,艾莉,范新明,等. 新型机载电源控制器高效便携式测试系统设计 [J]. 航空科学技术, 2017, 28 (7): 73-78.  
 [4] 黄安康,任秉银,崔贤玉. 电缆自动测试系统中程控矩阵开关设计 [J]. 计算机测量与控制, 2014, 22 (12): 4043-4045.  
 [5] 袁骅. 开关量电路模块测试系统设计 [J]. 微处理机, 2016 (5): 60-63.  
 [6] 侯铁宸,冯毅. 高速串行总线与传统航空总线的混合应用研究 [J]. 航空计算技术, 2019, 49 (3): 106-111.  
 [7] 柯杰,唐宏刚,周伟,等. 基于PXI总线的动力装置控制系统测试平台设计 [J]. 计测技术, 2014, 34 (6): 40-44.  
 [8] 张凯,李涵,姜静. 基于ATE与BIT组合的NAMP自动测试与故障诊断系统设计 [J]. 海军航空工程学院学报, 2015, 30 (4): 321-325.  
 [9] 刘宪忠,孙妍,张淑航. 面向弹载计算机的ATE通用平台设计与实现 [J]. 计算机工程, 2018, 44 (7): 60-73.

(上接第236页)

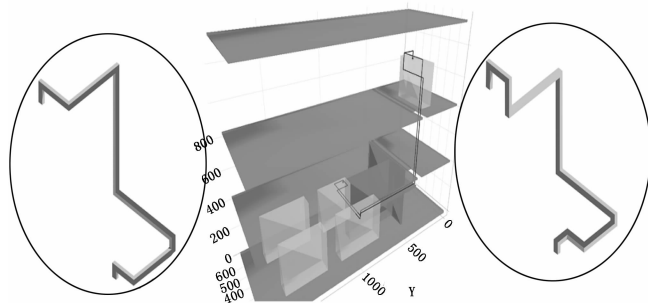


图8 三维环境下生成的路径

## 4 结论

传统的路径规划算法没有考虑到母线布局设计中的约束,将导致生成的路径无法指导母线的布局设计,本文在总结出母线布局设计约束与优化目标基础上,提出了一种新的RRT\*的自动布线算法。通过引入corner点的概念,改进原始算法的扩展方式由原来的向随机方向扩展变为垂直方向扩展,满足母线布局设计的走向约束。同时将贪心的路径优化引入算法的迭代过程中获得更短的路径长度,最少折弯次数,满足朝向约束的路径。最后,通过改进的算法和原始算法进行反复的仿真试验。结果表明,本文算法生成的路径可以很好的满足母线布局设计的需求,为实际工程中的母线布局设计起到了指导意义。

### 参考文献:

- [1] 肖兆斌. 低压母线槽安装与应用探讨 [J]. 机械研究与应用, 2017 (5): 169-171.  
 [2] Zhang T, Zhu Y, Song J. Real-time motion planning for mobile robots by means of artificial potential field method in unknown environment [J]. Industrial Robot, 2010, 37 (4): 384-400.  
 [3] 陈辉,张燕,夏庆锋. 移动机器人路径规划技术 [J]. 兵工自动化, 2018, 37, 234 (4): 68-71.  
 [4] 吴保胜,郭宇,王发麟,等. 基于改进蚁群算法的线缆路径规划技术研究 [J]. 计算机工程与应用, 2018, 54 (10): 236-241.

- [5] 陆皖麟,雷景森,邵炎. 基于改进A\*算法的移动机器人路径规划 [J]. 兵器装备工程学报, 2019, 40 (4): 197-201.  
 [6] 杨超杰,裴以建,刘朋. 改进粒子群算法的三维空间路径规划研究 [J]. 计算机工程与应用, 2019, 55 (11): 117-122.  
 [7] Latombe, J.-C. Motion Planning: A Journey of Robots, Molecules, Digital Actors, and Other Artifacts [J]. Journal of Robotics Research, 1999, 18 (11): 1119-1128.  
 [8] Karaman S, Frazzoli E. Sampling-based Algorithms for Optimal Motion Planning [J]. Journal of Robotics Research, 2011.  
 [9] Perez A T, Karaman S, Shkolnik A C, et al. Asymptotically-optimal path planning for manipulation using incremental sampling-based algorithms [A]. 2011 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, IROS 2011 [C]. San Francisco, CA, USA, September, 2011, 25-30.  
 [10] 王素琴,王飞,袁建平. 基于双向RRT算法的管线路径规划及建模仿真 [J]. 太原理工大学学报, 2018, 49 (6): 39-45.  
 [11] 刘潇,刘检华,刘佳顺. 基于改进RRT算法的线缆自动布线技术 [J]. 机械工程学报, 2015, 51 (17): 96-105.  
 [12] 刘佳顺,刘检华,张之敬. 基于任意时间RRT算法的三维自动布线技术 [J]. 机械工程学报, 2016, 52 (13): 156-165.  
 [13] Qureshi A H, Ayaz Y. Intelligent bidirectional rapidly-exploring random trees for optimal motion planning in complex cluttered environments [J]. Robotics and Autonomous Systems, 2015, 68: 1-11.  
 [14] Jordan M, Perez A. Optimal Bidirectional Rapidly-Exploring Random Trees [Z]. 2013.  
 [15] Kuffner J J, Lavelle S M. RRT-connect: An efficient approach to single-query path planning [A]. Proceedings 2000 ICRA. Millennium Conference. IEEE International Conference on Robotics and Automation, Symposia Proceedings (Cat. No. 00CH37065) [C]. IEEE, 2002.  
 [16] Perez A T, Karaman S, Shkolnik A C, et al. Asymptotically-optimal path planning for manipulation using incremental sampling-based algorithms [A]. 2011 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, IROS 2011 [C]. San Francisco, CA, USA, September 25-30, 2011. IEEE, 2011.