

基于嵌入式技术的小型化导弹测试设备设计

关凯元, 葛善乘, 李坤龙, 张凯强, 叶源飞

(上海机电工程研究所, 上海 201109)

摘要: 为减小导弹测试设备体积, 压缩设备重量, 提升导弹保障性和测试效率, 基于嵌入式技术研制一种小型导弹测试设备; 在结构上摆脱传统机箱架构形式, 采用板卡堆叠方式, 通过串口通信实现板间数据交换与测试资源配置, 减小设备体积; 基于STM32主控芯片, 板卡采用主-从双核设计, 根据功能需求划分主从机外设配置, 实现一卡多能; 兼容以太网控制与触摸屏离线控制, 可脱离工控机独立工作, 进一步减少设备需求; 采用面向对象的软件设计思想, 按照功能化、层次化、模块化进行软件功能划分与设计; 通过与某型导弹测试模拟器对接试验, 验证其功能完全满足导弹测试资源需求, 与传统机箱架构测试设备比较, 体积压缩近70%, 总重量减少50%以上。

关键词: 嵌入式; 小型化; STM 32; 导弹测试; 测试设备

Design of Miniaturized Missile Test Equipment Based on Embedded Technology

GUAN Kaiyuan, GE Shancheng, LI Kunlong, ZHANG Kaiqiang, YE Yuanfei

(Shanghai Electro-Mechanical Engineering Institute, Shanghai 201109, China)

Abstract: To reduce the volume and weight of missile testing equipment, improve missile support and testing efficiency, a small missile testing equipment based on embedded technology is developed; Breaking away from the chassis architecture in terms of structure, adopting a board stacking method, and implementing data exchange and testing resource configuration between boards through serial communication to reduce device size; Based on the STM32 main control chip, the board adopts a master-slave dual core design, and is divided into master-slave peripheral configurations according to functional requirements to achieve multiple functions on one board; Compatible with Ethernet control and touch screen offline control, it can work independently without an industrial computer, further reducing equipment requirements; Adopting object-oriented software design philosophy, dividing and designing software functions according to functionality, hierarchy, and modularity; Through docking tests with a certain type of missile testing simulator, it was verified that its functions fully meet the requirements of missile testing resources. Compared with traditional chassis architecture testing equipment, the volume was compressed by nearly 70% and the total weight was reduced by more than 50%.

Keywords: embedded; miniaturization; STM 32; missile test; test equipment

0 引言

导弹测试作为导弹技术保障的重要一环, 直接关系到导弹战斗任务的成败^[1]。目前, 常见导弹测试设备主要是基于PXI、PXIE等总线机箱架构的测试单元集成, 依据被测信号特点和激励需求叠加测试功能板卡, 其主要的应用场景是在弹药库或维修车间, 对于针对导弹战前备战及战时保障的需求, 则需要测试设备体积重量越小越方便。传统的PXI、PXIE等测试模块系列集成的测试设备主要是基于总线机箱架构, 其设备体积不至于太大, 但大多数也不适用于导弹战备随装、单兵携带等应用场景。

因此, 当前导弹测试设备存在体积大、质量重的特点, 一般适用于库房测试或维修车间, 不适用于一线导弹技术保障或战备值班检查环节。随着电子技术、集成电路和芯片技术的飞速发展, 基于嵌入式技术的测试设备朝着小型

化、集成化的方向不断发展^[2]。通常, 我们把微型计算机与某个领域的操作对象相结合, 完成对象的自动化控制, 将这种失去通用计算机功能、面向专业对象体系的计算机系统称作嵌入式系统。基于嵌入式系统的可裁剪性, 可依据产品需求, 选择特定嵌入式系统类型。对于嵌入式系统而言, 不同类型的产品所需要的具体功能不同, 但主要架构都可以分为4个部分: 微控制单元、存储模块、I/O模块和嵌入式软件^[3-7]。本文提出一种基于嵌入式技术的小型化导弹测试设备, 摆脱传统机箱架构形式, 采用堆叠式架构, 具备脱离上位机独立工作的能力, 可满足一线导弹技术保障与战备值班检查对导弹测试设备便携性、机动性和高效性的要求。

1 总体设计

1.1 功能需求分析

导弹测试是测试设备对被测导弹发布测试指令, 执行

收稿日期: 2024-08-25; 修回日期: 2024-09-09。

作者简介: 关凯元(1993-), 男, 硕士, 工程师。

引用格式: 关凯元, 葛善乘, 李坤龙, 等. 基于嵌入式技术的小型化导弹测试设备设计[J]. 计算机测量与控制, 2024, 32(12): 166-171.

测试动作, 采集测试结果的过程^[8-11]。因此, 导弹测试设备功能需求分为四大类, 即通信功能、控制功能、激励功能与采集功能。基于总线机箱架构的测试设备通过专用功能板卡实现以上功能, 为压缩设备体积, 基于嵌入式技术的小型化导弹测试设备, 使用集成专用板卡, 实现一卡多能, 并通过堆叠连接方式扩展设备资源。小型化导弹测试设备应具备如下功能:

1) 通信功能: 即测试设备与被测单元之间进行通信, 进行测试指令发布与测试数据回传。因此小型化测试设备应兼容 RS-232、RS-422 等串口以及 CAN 通信功能;

2) 控制功能: 即人机交互功能, 操作者通过上位机或按键屏幕直接或间接控制测试设备。因此小型化测试设备应兼容上位机以太网控制和触摸屏控制功能;

3) 激励功能: 即测试设备实现对被测单元的加断电、电平信号与开关量注入等激励控制。因此小型化测试设备应具备继电器驱动能力, 可实现开关信号控制、激励信号选择等功能;

4) 采集功能: 即测试设备对表征被测单元状态的模拟电信号的采集功能, 如对点火、激活等电压信号的采集。因此小型化测试设备应具备模拟量采集、电压信号比较等功能;

5) 辅助功能: 即测试设备应具备状态指示、数据存储、电池电压监测等辅助功能。

1.2 总体架构设计

根据导弹测试设备功能需求分析, 小型化导弹测试设备应兼容 RS-232、RS-422、CAN 等多种通信接口; 同时兼容工控机以太网控制和触摸屏控制, 可以通过以太网接收工控机发布的测试指令, 并依据指令执行测试动作, 也可以通过触摸屏直接操作执行导弹测试动作; 具备继电器驱动能力, 可实现开关和激励信号控制; 同时具备模拟电信号采集功能。

为实现测试设备小型化、轻量化设计要求, 小型化导弹测试设备摒弃传统总线机箱架构, 采用板卡堆叠连接方式。功能板卡设计基于嵌入式技术, 采用通用化、模块化设计方法, 在一块板卡上集成通信、控制、信号采集、激励输出等功能, 实现一卡多能。软件配置主控板卡, 通过堆叠方式连接板卡扩展资源, 板卡间通过串口通信实现指令传输与数据交换, 主控板卡控制各功能板卡实现通信、激励输出、信号采集等不同功能。小型化导弹测试设备总体设计如图 1 所示。

2 硬件设计

2.1 总体设计

为压缩设备体积, 减轻重量, 基于嵌入式技术的小型化导弹测试设备采用堆叠式架构, 功能板卡实现一卡多能, 板卡外形尺寸不大于 $30 \times 20 \times 3.0$ cm (长×宽×高), 并通过电路板边缘的螺柱安装于 $40 \times 25 \times 10$ cm 的便携式机箱中。功能板卡通过串口总线实现板卡间指令与数据传输。

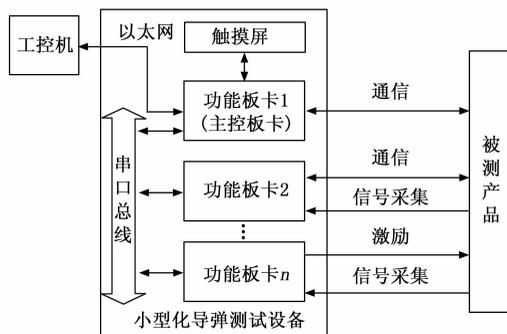


图 1 小型化导弹测试设备总体设计框图

根据测试设备功能需求分析, 功能板卡应兼容多种通信接口, 同时兼容工控机以太网控制和触摸屏控制, 具备继电器驱动能力和模拟电信号采集功能, 并具备数据存储、状态指示等辅助功能。因此, 功能板卡按功能模块分为控制单元、通信单元、继电器驱动单元、信号采集单元、辅助功能单元与 DC-DC 电源单元。

参照传统机箱架构测试设备资源配置, 分析导弹测试资源需求, 一块功能板卡应同时兼容 RS-232、RS-422、CAN 通信功能; 同时具备以太网通信接口以及触摸屏接口; 继电器驱动通道不少于 8 路; AD 采样通道不少于 16 路; 具备数据存储接口、LED 状态指示灯; 兼容锂电池与外接 24 VDC 电源供电。

为满足上述功能需求, 合理分配板卡功能外设, 功能板卡硬件采用主—从双核设计, 主机通过外设接口, 直接实现通信、继电器驱动等功能; 从机通过 AD7616 芯片, 实现信号采集等功能; 主—从机通过 SPI (Serial Peripheral Interface, 串行外设接口) 实现指令传输与数据交换。小型化导弹测试设备功能板卡硬件方案如图 2 所示。

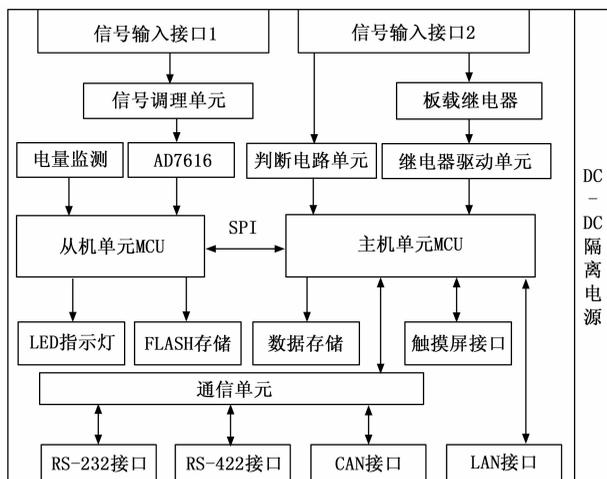


图 2 功能板卡硬件方案框图

2.2 控制单元

功能板卡控制单元采用主—从双核设计, 当前常见嵌入式微处理器主要架构体系有 ARM、MIPS、Power PC 和

X86 等^[12-16]。小型化导弹测试设备控制单元选用 ARM 架构 MCU (Micro Controller Unit, 微控制单元), 使用 STM32F103 系列微控制单元作为控制中心^[17-19]。主机单元利用 MCU 自带 FSMC (Flexible Static Memory Controller, 可变静态存储控制器) 接口连接 TFT 触摸屏模块, 利用微控制单元 SPI 接口结合以太网控制芯片, 实现兼容触摸屏离线控制与以太网控制功能; 利用微控制单元 GPIO (General-Purpose Input/Output, 通用型输入输出) 端口实现继电器与辅助外设驱动; STMT32 微控制单元自带 USART (Universal Synchronous/Asynchronous Receiver/Transmitter, 通用同步/异步串行接收/发送器) 接口和 CAN 通信外设, 配合外围电路实现 RS-232、RS-422 和 CAN 通信功能; 利用微控制单元自带 AD 外设, 实现模拟电信号比较功能。从机控制单元使用相同型号微控制单元芯片, 配合 AD7616 模数转换芯片, 实现 16 通道双极性电压采集功能; 从机利用微控制单元自带 SPI2 接口, 配合 FLASH 存储芯片, 实现采集电压信号的高速存储。主-从控制单元通过微控制单元自带 SPI3 通信接口实现指令传输与数据交换。

功能板卡选择 ALIENTEK 生产的 7 寸 TFT 触摸屏模块作为测试设备的人机交互单元。该 TFT 触摸屏模块搭载 NT35510 显示驱动芯片和 OTT2001A 电容触摸驱动芯片, 采用 8080 并口方式与主机控制单元连接; 主机控制单元通过 FSMC 接口控制 LCD 屏显示, 通过 IIC 接口控制屏幕触摸功能^[20]。主机控制单元使用 MCU 的 SPI1 接口连接 CH392F 以太网控制芯片, 配合外围电路, 实现以太网控制功能。

2.3 通信单元

功能板卡通信功能包括: RS-232、RS-422 以及 CAN 通信接口。STM32F103 系列微控制单元自带 3 路 USART 接口, 选用主控制单元的 USART1 与 USART2 外设接口, 结合 RS-232 和 RS-422 通信控制芯片, 实现设备串口通信功能; STM32F103 系列微控制单元自带 CAN 通信外设接口, 配合 CAN 通信控制器外围电路, 实现设备 CAN 通信功能。

2.4 继电器驱动单元

导弹测试过程中, 需要控制继电器执行动作, 实现加断电、开关信号控制、激励信号选择等激励功能, 单刀单掷继电器可用于开关信号通断, 单刀双掷继电器可用于激励信号选择控制。为减小继电器动作产生的电磁干扰, 继电器驱动电路采用光耦隔离设计, 主机控制单元 MCU 具备 GPIO 功能, 利用三极管开关功能, 微控制单元 I/O 端口输出高低电平, 控制继电器吸合/断开动作。

2.5 信号采集单元

功能板卡信号采集单元由电压采集模块和电压比较模块组成, 电压采集模块可实现 16 路差分双极性模拟电压采集, 电压比较模块用于电气信号的通断检测。

电压采集模块由从机单元配合 AD7616 模数转换芯片实

现。AD7616 模数转换芯片与从机单元采用 SPI 通信模式, 从机微控制单元使用外设 SPI1 与 AD7616 实现数据交换; 同时, 从机微控制单元使用外设 SPI2 与外置 FLASH 芯片 W25Q128 连接, 实现电压信号采集数据的高速存储。

AD7616 芯片可采集 ± 10 V 范围内差分电压, 为满足不小于 30 V 电压采集范围要求, 在功能板卡信号采集单元前端设计有信号调理电路。信号调理电路分为分压单元、放大单元和滤波单元。分压单元通过高阻抗电阻, 将被测单元产生的高压信号分压至 AD7616 芯片可采集的电压范围内; 放大单元选择 AD620 高精度测量放大器芯片作为第一级放大器, 配合 OP07 放大器芯片设计信号放大单元电路, 将被测单元产生的微小信号进行放大, 提高电压采样灵敏度; 滤波单元设计二阶巴特沃斯滤波电路, 选出有用的信号部分, 同时尽量滤除无用的部分^[20]。

导弹加电测试前, 需要对其关键电气接插件或线缆进行通断状态检查, 判断接插件连接情况和线缆状态。目前, 常用通断状态检查方法有二线制电压检查法、恒流源电阻测量法等。为压缩设备体积, 减少设备重量, 降低设备复杂程度, 提高设备可靠性, 小型化导弹测试设备采用电压比较方法, 在导弹通电前检查其电气连接状态。电压比较模块由主机单元 MCU 自带 AD 采集外设实现。被测端 1 通过上拉电阻接高电平, 被测端 2 通过下拉电阻接地, 若两被测端短路, 则通过逻辑比较器 U1 输出低电平, 进而通过电压比较器 U2 输出低电平, 主机微控制单元 AD 外设端电压被拉低, 采集到低电压; 反之 AD 端口采集到高电压, 则证明被测端 1 与被测端 2 为断路状态。

2.6 辅助功能单元

功能板卡辅助功能包括状态指示、数据存储及电池电量检测等功能。

为满足小型化导弹测试设备离线单机工作要求, 功能板卡应具备数据存储功能。因此, 通过主机控制单元 MCU 的 SDIO 外设接口, 连接存储卡外围电路, 实现测试信息与数据的存储功能。功能板卡利用从机控制单元 MCU 的 GPIO 外设驱动 LED 指示灯表征设备状态, 并利用 AD 外设采集监测电池电压, 判断电池电量。

2.7 DC-DC 电源单元

DC-DC 电源单元为小型化导弹测试设备提供 5 V 和 3.3 V 驱动电源, 5 V 为触摸显示屏、继电器等外设供电, 3.3 V 用于 MCU、通信芯片等元器件供电。DC-DC 电源单元采用二级降压设计, 直流适配器输入 24 V 直流电压, 经 DC-DC 模块电源 (VRB2405ZP-6WR3) 输出直流 5 V 电压; 5VDC 经 LM1117-3.3 稳压芯片输出 3.3 V 直流电压。

3 软件设计

3.1 软件总体设计

小型化导弹测试设备功能板卡采用主-从双核设计, 主机控制单元主要完成小型化测试设备的人机交互控制、通信、端口驱动等应用功能; 从机控制单元主要完成小型

化测试设备的 AD 采集、电量监测等应用功能; 主-从控制单元通过 SPI 端口实现指令与数据传输。

依据软件应用层功能需求, 小型化导弹测试设备软件设计采用面向对象的设计思想, 按照功能化、模块化进行软件功能与层次划分, 分为人机交互层、任务控制层、文件操作层和应用驱动层, 各层级之间通过公共接口连接, 避免深度耦合。测试设备软件结构如图 3 所示。

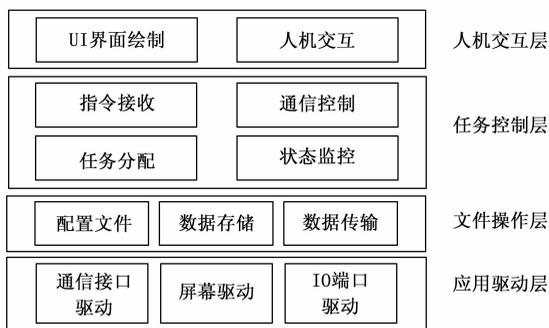


图 3 测试设备软件结构框图

3.2 软件功能分析

依据小型化导弹测试设备功能需求, 其软件功能主要划分为人机交互层、任务控制层、文件操作层和应用驱动层, 各功能层又由独立软件功能单元组成。

根据设备操作界面功能分析, 人机交互层软件功能分为信息录入、功能配置与指令发布三部分。操作者通过主界面功能按键, 进入二级子菜单可进行信息录入与功能配置, 通过主界面命令按键进行指令发布。根据实现功能的不同, 人机交互层由 UI (User Interface, 即用户界面) 绘制功能单元和人机交互功能单元组成。UI 界面绘制功能单元用于测试设备触摸屏操作界面绘制与显示, 同时刷新屏显示信息, 反馈测试消息与设备状态; 人机交互功能单元用于捕捉屏幕触点信息, 获取用户输入的操作指令。

任务控制层由指令接收功能单元、通信控制功能单元、任务分配功能单元以及状态监测功能单元组成。指令接收功能单元用于接收和处理用户输入的操作指令, 并转发至任务分配功能单元; 任务分配功能单元根据指令接收功能单元发送的操作指令, 将操作指令分解为外设动作, 并根据时序逻辑要求, 驱动各外设依次执行动作完成指令要求; 通信控制功能单元一方面用于功能板间的指令和数据交换, 还用于功能板上主-从控制单元的通信控制, 另一方面, 还用于实现测试设备与被测单元的指令发布和结果回传; 状态监测功能单元用于测试设备自身的状态监测, 如测试设备的电池电量监测、功能板上主-从控制单元通信监测, 以及功能板间通信状态监测。

文件操作层由配置文件功能单元、数据存储功能单元和数据传输功能单元组成。配置文件功能单元用于文件操作管理系统的基本配置, 是文件操作层的基础; 数据存储与数据传输用于新建、删除、读取、写入等针对文件的操

作管理。

应用驱动层是人机交互层、任务控制层和文件操作层的运行基础, 根据上层应用需求, 分为通信接口驱动功能单元、屏幕驱动功能单元和 IO 端口驱动功能单元。通信接口驱动功能单元配置微控制单元通信接口相关外设, 如 USART 接口外设、SPI 接口外设等, 用于支持任务控制层的指令接收、通信控制以及文件操作层的数据存储与传输等功能; 屏幕驱动功能单元配置主机微控制单元的 FSMC 接口, 支持人机交互层的 UI 界面绘制与人机交互功能; IO 端口驱动功能单元根据端口功能划分, 对微控制单元端口进行功能配置, 即相应端口的寄存器配置, 如端口推挽功能、模数转换功能、触发中断功能配置等。

3.3 软件工作流程

小型化导弹测试设备功能板卡采用主-从双核设计, 主机控制单元程序是小型化导弹测试设备软件程序的核心, 主要工作流程如图 4 所示, 首先完成主控单元 MCU 的外设初始化配置, 为测试设备执行各项测试动作做好准备; 然后在触摸屏构建 UI 界面, 使能触发中断与接收中断, 等待触摸屏检测到触摸操作或网口接收到正确指令后进入中断操作执行对应软件分支; 主控单元 MCU 依据进入软件分支内的功能需求依次调用通讯、端口输出等外设功能函数; 最后, 指令动作完成后, 程序退出外设调用, 回到中断循环等待, 并在下次中断请求发出后再次及时响应。从机控制单元协助主机控制单元, 配合 AD7616 完成电压采集、电池电量监测等功能; 使能接收中断, 等待接收主机发布的指令, 之后进入中断操作程序分支, 执行对应功能软件; 依据进入软件分支的功能需求, 调用外设功能函数, 完成指定动作后, 回复数据结果, 接收中断标志清零, 程序退出外设调用, 继续回到接收中断循环等待。

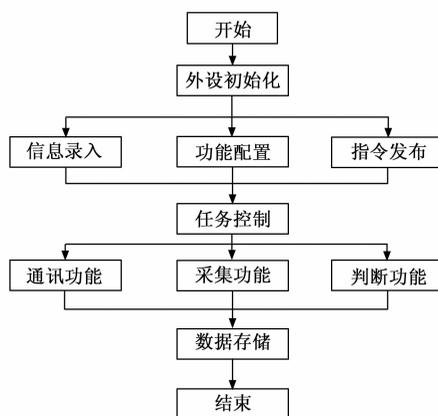


图 4 测试设备软件流程图

3.4 软件功能实现

小型化导弹测试设备软件烧录在功能板卡的嵌入式计算机内核中, 以基于 ARM 架构的 STM32F103 系列微控制单元作为控制器, 使用 MDK5 作为集成开发环境, 实现测试设备通信、控制、激励与采集等功能。MDK5 提供 C 语

表 1 测试模拟器测试项目、测试资源需求及测试结果统计表

序号	测试项目	测试资源需求	小型化测试设备	PXI 机箱测试设备	结果
1	类型识别	AD 采样	16 通道 ADC 端口	手动导通	合格
2	通信地址设置	开关信号切换	8 通道 I/O 驱动继电器	6 通道继电器板卡	合格
3	测试指令发布	RS-422	2 通道 USART	串口通信板卡	合格
4	测试结果回读	RS-422	2 通道 USART	串口通信板卡	合格
5	电源程控	LAN	SPI 转以太网	PC 机以太网	合格
6	产品加电	继电器驱动	8 通道 I/O 驱动继电器	6 通道继电器板卡	合格
7	产品断电	继电器驱动	8 通道 I/O 驱动继电器	6 通道继电器板卡	合格
8	计算机 BIT	RS-422	USART	串口通信板卡	合格
9	导通判断	通/断判断	16 通道 ADC 端口	万用表	合格
10	电压激励	开关信号切换	8 通道 I/O 驱动继电器	6 通道继电器板卡	合格
11	安装好判断	通/断判断	16 通道 ADC 端口	万用表	合格
12	设备外形体积/cm		40×25×10	机箱 48×13.5×55 PC 机 43×8.5×23.5	—
13	设备重量/kg		约 8	约 16	—

言编译器和管理器组件,可将设备功能抽象为微控制单元外设功能,通过 USART、SPI、I/O 和 ADC 等微控制单元外设控制,配合外部电路实现具体功能。依据软件功能层级划分,各层级软件功能实现方法如下:

1) 人机交互层软件实现:人机交互层软件实现基于应用驱动层提供的 FSMC 总线接口驱动开发。在设备启动完成外设初始化配置后,主机单元 UI 界面绘制功能单元调用绘制矩形、直线、填充颜色等功能函数,绘制触摸屏的人机交互界面;在设备运行过程中,人机交互功能单元调用连续扫描功能函数,捕捉触点信息,获取操作指令。

2) 任务控制层软件实现:任务控制层软件实现基于应用驱动层提供的 USART 接口、SPI 接口、GPIO 端口、AD 端口等驱动开发。USART 接口函数和 SPI 接口函数中的数据接收标志位触发接收中断,使程序线程跳转到指定功能的软件分支中;进入指定功能的软件分支后,调用 GPIO 端口的高/低电平输出函数用于驱动继电器开合动作;调用 USART 或 SPI 接口的数据收发函数用于测试指令以及测试信息的传输;调用 AD 端口函数用于采集指定通道的电压信号。

3) 文件操作层软件实现:为实现新建、删除、读取、写入等针对文件的操作管理功能,小型化导弹测试设备应用了 FATFS 文件管理系统。FATFS 文件管理系统是一种开源的文件系统,采用标准 C 语言编写,核心设计思路是小块数据能够通过 buffer 存储,大块数据直接存取,提高存取速度和效率,适用于嵌入式系统的文件操作^[20]。微控制单元通过调用 FATFS 文件管理系统 f_open()、f_read() 等 API 函数,读取测试任务与相关配置文件信息,通信控制单元依据配置文件信息初始化相关外设硬件,配置相应测试资源;在设备运行过程中,通过 f_open()、f_write() 等 API 函数,记录并存储相关测试信息。

4) 应用驱动层软件实现:应用驱动层软件是其他层级

软件功能实现的基础。主要用于微控制单元所有外设的上电初始化,以及依据其他层级软件功能需求,对相应外设进行功能化配置,如 GPIO 端口的推挽模式配置、AD 端口的采样精度和采样速率配置、通信端口的通信模式和通信速率配置等。

4 实验结果与分析

为验证小型化导弹测试设备功能是否满足设计要求,使用导弹测试模拟器进行测试验证。导弹测试模拟器通过电压采集单元,监测测试设备加断电功能,检测测试设备激励输出情况,判断测试设备通信地址设置;模拟器通过 TTL 电平输出单元模拟产品类型识别、通/断信号与安装状态检查;模拟器通过串口通信与故障配置功能模拟产品通信与自检状态回告。

由上述测试验证结果可见,基于嵌入式技术的小型化导弹测试设备,可实现 16 通道的 AD 采集,8 通道的继电器控制,6 通道的电压比较以及 2 通道的串口通信功能,其硬件资源完全覆盖当前测试资源需求,以基于 PXI 总线的传统机箱架构测试设备为参照,导弹测试模拟器测试项目、测试资源需求及测试结果见表 1。与 PXI 机箱架构测试设备相比,小型化导弹测试设备硬件资源可完全覆盖传统 PXI 机箱架构测试设备,而设备体积压缩近 70%,总重量减少 50% 以上。

5 结束语

本文介绍了一种基于嵌入式技术的小型化导弹测试设备,摆脱传统机箱架构,设计集成化功能板卡,采用堆叠式扩容,有效压缩设备体积重量;功能板卡采用主—从双核设计,合理分配控制单元外设资源,最大化扩展板卡功能,实现一卡多能;兼容以太网控制和触摸屏控制,可脱离工控机独立工作,减少设备需求;软件采用面向对象的设计思想,按照功能分层次、单元进行设计。由对照试验

可见, 基于嵌入式技术的小型化导弹测试设备具有体积小、重量轻、机动灵活、方便高效的特点, 可满足导弹日常维护测试、保障测试及战备值班测试等工况需求。

参考文献:

- [1] 张文广, 肖支才, 秦亮. 基于嵌入式技术的测试设备远程监控数据采集设备 [J]. 计算机测量与控制, 2019, 27 (2): 38-42.
- [2] 唐大林, 周庆飞, 毛鹏飞. 基于 Rapid IO 总线的简约化小型导弹测试设备设计 [J]. 计算机测量与控制, 2021, 29 (11): 127-131, 136.
- [3] 曾隆华. 多总线采集嵌入式实时系统的设计与实现 [D]. 成都: 电子科技大学, 2019.
- [4] 宫琳, 徐任杰. 关于装备体系韧性的几点思考 [J]. 空天防御, 2023, 6 (3): 1-5.
- [5] 尚梦. 某型数据链工作原理与测试技术 [J]. 长江信息通信, 2022, 35 (3): 153-155.
- [6] 王健, 曹向忠, 丁高林. 基于 ARM 的国产化便携式保障设备设计 [J]. 机械管理开发, 2023, 38 (12): 179-181.
- [7] 吴伟, 梁旗, 林达, 等. 导弹机内测试技术的国内外发展现状 [J]. 计算机测量与控制, 2023, 31 (10): 1-5.
- [8] 苏泓嘉, 罗宇成, 刘飞. 装备体系效能评估及支撑技术综述 [J]. 空天防御, 2023, 6 (3): 29-38.
- [9] 孙成, 陈泽宏, 牛康, 等. 基于 FPGA 的便携式导弹快速测试方法研究 [J]. 计算机测量与控制, 2020, 28 (3): 148

(上接第 165 页)

- [6] 卜晓东. 多区域电力系统数据驱动负荷频率控制 [D]. 柳州: 广西科技大学, 2023.
- [7] 刘晓桂, 刘小文, 蒋逢灵, 等. 含 PID 参数的时滞 LFC 系统鲁棒稳定性分析 [J]. 湖南工业大学学报, 2023, 37 (1): 31-39.
- [8] 周一辰, 杨洋, 李永刚, 等. 区域一致趋同的分布式负荷频率控制方法研究 [J]. 智慧电力, 2024, 52 (3): 80-86.
- [9] 方仍存, 桑子夏, 刘知行, 等. 基于改进协同量子粒子群算法的多微网负荷频率控制 [J]. 电力建设, 2023, 44 (7): 87-97.
- [10] LI M, WEI C, ZHAO R, et al. A unified model of a virtual synchronous generator for transient stability analysis [J]. Electronics, 2024, 13 (17): 3560-3560.
- [11] ZHAI B, OU K, WANG Y, et al. Parameter identification of PMSG-based wind turbine based on sensitivity analysis and improved gray wolf optimization [J]. Energies, 2024, 17 (17): 4361-4361.
- [12] SHANKAR A, PARAMMASIVAM K, SUBRAMANIAN N S. A review on computational studies on hydrogen combustion for gas turbine applications [J]. Aircraft Engineering and Aerospace Technology, 2024, 96 (9): 1225-1233.
- [13] OSOMTSEV V K, PSHEENISONOV A N, PSHEENISONOV I A. Analysis of operation of the oil-supply system of steam turbine before and after maintenance [J]. Thermal Engineering,

-153.

- [10] 邵金荣, 王瑞, 郭雨华. 一种新型导弹测试系统构建方法 [C] // 全国仿真技术学术会议论文集, 2021: 82-84.
- [11] 郭璐, 刘晓东, 王玉峰, 等. 基于大数据推理的装备健康状态控制决策 [J]. 空天防御, 2023, 6 (3): 85-94.
- [12] 李磊, 李玲玲. 某雷达测试设备控制系统的设计 [J]. 火控雷达技术, 2017, 46 (2): 69-74.
- [13] 何丽, 陈波. 嵌入式测试在航空电子设备中的设计与实现 [J]. 航空科学技术, 2020, 31 (9): 59-64.
- [14] 岳春玉, 陈娇娇, 聂涛, 等. 导弹测试中的通用火工品模拟盒设计 [J]. 电子测试, 2023 (4): 100-103.
- [15] 胡建, 韩登峰. 多通道自校准导弹飞控测试系统设计 [J]. 电子设计工程, 2023, 31 (2): 103-106.
- [16] 胡车, 刘钧圣, 张延风, 等. 基于 LXI 和 USB 的某导弹测试系统设计 [J]. 新技术新工艺, 2023 (8): 25-30.
- [17] 张友华, 叶楠, 姜凤军, 等. 基于 STM32 单片机的无人艇通信导航控制器设计 [J]. 自动化与仪器仪表, 2022 (2): 204-208.
- [18] 李标俊, 向权舟, 谢保鸡, 等. 基于嵌入式 Linux 的电力巡检机器人自动化控制系统设计 [J]. 自动化与仪器仪表, 2020 (10): 149-152.
- [19] 石大山, 葛宇航, 孟光韦, 等. 弹载综合电子系统及其关键技术发展分析 [J]. 空天防御, 2023, 6 (3): 52-57.
- [20] 张涛, 张龙, 张国群, 等. 软件定义系统技术研究综述 [J]. 空天防御, 2024, 7 (2): 1-7.
- [14] 李昊, 荣娜, 邓棋宸. 基于 MATSAC-LSTM 的综合能源系统自动发电控制算法研究 [J]. 智能计算机与应用, 2023, 13 (10): 108-114.
- [15] 于琳琳, 司瑞华, 常青青, 等. 基于区域控制偏差的电池储能参与电网二次调频的容量配置方法 [J]. 可再生能源, 2023, 41 (8): 1129-1136.
- [16] 唐求, 李琛恭, 花金辉, 等. 基于新型改进矩阵束的便携式电网同步相量测量装置 [J]. 湖南大学学报 (自然科学版), 2024, 51 (6): 159-167.
- [17] KUMAR M, KUMAR S M. Performance enhancement of band-pass FIR filter-based M-class phasor estimation [J]. Journal of Electrical Engineering, 2024, 75 (2): 124-136.
- [18] 刘勇, 刘斌, 傅志忠, 等. 时滞孤岛微电网负荷频率控制在采样控制下的指数稳定 [J]. 电力科学与工程, 2024, 40 (5): 1-8.
- [19] ALLUHYDAN K, SAYED E T A, BAHRAWY E T F. The effect of proportional, proportional-integral, and proportional-integral-derivative controllers on improving the performance of torsional vibrations on a dynamical system [J]. Computation, 2024, 12 (8): 157-157.
- [20] 马苗苗, 李钰梅, 崔婧, 等. 基于事件触发的互联电力系统分布式负荷频率预测控制 [J]. 中国科学: 信息科学, 2023, 53 (7): 1392-1403.