

基于 LabVIEW 的高速多通道航天器通用测试系统设计

高延超, 梁 克, 仪德英

(中国空间技术研究院载人航天总体部, 北京 100094)

摘要:传统“微处理器+AD组件”的实现方式,在采集控制及数据处理等方面已很难满足多通道高速并行测试的需求;随着航天器系统及其设备复杂程度的逐渐提高,为满足航天器系统中多状态高速并行测试的要求,提出了一种基于 LabVIEW 的高速多通道航天器通用测试系统设计方案;该系统硬件架构采用 PXI 机箱、采集板卡、指令控制板卡及处理器板卡,同时基于 LabVIEW 平台进行系统软件开发,实现了多通道高速并行数据采集控制、数据实时显示、数据存储、数据回放及指令控制等功能;通过测试验证,该测试系统能够支持同时 128 通道在总采样率 1 KHz 下的高速并行采集控制及后续数据处理,并能够支持 64 通道的指令配置及控制;通过长时间累积测试试验,结果表明本系统工作稳定可靠且通用性良好,具有很好的实用价值。

关键词:航天器; LabVIEW; 高速; 多通道; 并行采集

Design of a High-Speed Multi-channel Spacecraft Universal Testing System Based on LabVIEW

Gao Yanchao, Liang Ke, Yi Deying

(Institute of Manned Space System Engineering, China Academy of Space Technology, Beijing 100094, China)

Abstract: The traditional realization of “MCU+AD component” has been difficult to meet the needs of high-speed parallel multi-channel test in data acquisition and processing. With the increase of spacecraft system, for the high-speed parallel testing need of spacecraft, a design of high-speed multichannel spacecraft universal testing system based on LabVIEW is presented. The hardware architecture of the system uses PXI chassis, acquisition board, command control board card and processing board card. The software of the test system based on LabVIEW achieves functions of high-speed parallel multi-channel acquisition control, data real-time display, data storage, data playback and command control. Result shows that his testing system can support the high-speed parallel acquisition control of 128 channels in the total sampling rate of 1 kHz. After a long-time test, the test results show that this testing system works stably and reliably, and has good practical value.

Keywords: spacecraft; LabVIEW; high-speed; multi-channel; parallel acquisition

0 引言

随着航天器系统及其设备复杂程度的不断提高,为充分检测系统及设备工作状态的全面性,对于航天器测试系统高速并行测试能力要求越来越高。航天器系统具有设备多、工作状态多且耦合关系复杂的特点,为了全面、真实的对航天器工作状态进行测试验证,特别是类似火工多通道高速切换过程中的状态信号,常常需要航天器地面测试系统具备多通道、高精度、高速并行信号采集及处理能力^[1-2]。对于百量级通道的高速多通道并行采集系统^[3],信号采集控制及处理难度、采集数据规模都很大,采用“单片机+AD采集组件”的传统实现方式很难满足多通道高速并行信号的采集控制、数据传输、数据存储与回放需求。

LabVIEW 是一种面向对象的图像化编程语言,由于其采用数据流编程方式,而且内部有庞大可直接调用的控制

及数据处理函数库,可大大提高系统开发效率,广泛应用于数据采集系统的开发^[4]。LabVIEW 是 NI 设计平台的核心,NI 硬件模块+LabVIEW 软件的开发模式为高性能测试系统开发与实现提供了一种可行的途径。本系统采用 PXI 机箱、PXI 采集板卡及指令控制板卡的硬件架构,同时基于 LabVIEW 平台进行软件开发,实现了一套最大 128 通道、高速、高精度、并行采集的通用数据采集系统,并具备灵活的测试控制能力,为航天器系统状态多通道高速并行采集及控制提供了可靠的测试手段。

1 硬件结构及原理

本系统针对航天器火工控制装置的多通道火工负载切换控制及切换状态的测试验证,并兼顾测试系统通用性进行设计。根据功能分配,本系统硬件架构主要由数据采集模块、指令控制模块、传输及处理模块、显示操作模块组成,具体包括 1 套 14 插槽 PXI 机箱 1 套、8 块 16 通道 PXI-3354 数据采集板卡、1 块 64 通道 PXI-3305 指令板卡、1 块 PXI 处理器板卡 1 块及必要的显示操作设备。通过被测系统与测试系统间适配合理的转接电缆,可实现本测试系

收稿日期:2019-01-23; 修回日期:2019-02-18。

作者简介:高延超(1986-),男,山东滕州人,硕士研究生,主要从事航天器信息系统研究及设计方向的研究。

统的通用化应用。

系统硬件结构如下图所示。

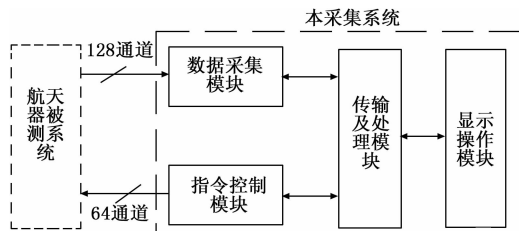


图1 系统硬件结构图

1.1 数据采集模块硬件设计

数据采集模块负责采集 128 路火工负载通道切换状态信号，每通道信号正常状态为 $+5.0\text{ V} \sim 0\text{ V}$ 、脉宽为 10 ms 负脉冲信号。根据香农采样定律，为确保所有 128 通道信号完整且不失真，所有通道的总采样率不能低于 200 Hz 。本系统的数据采集模块中，所有 128 通道总采样率设计为 1 KHz 。考虑信号完整性、通道数量、采集速率及精度、采集电压范围及成本等各种因素，本系统的数据采集模块硬件由 8 块 16 通道的 PXI-3354 数据采集板卡组成。

PXI-3354 是带隔离功能的多功能数据采集板卡，内置 18 位 ADC，单通道采样速率最高 1.25 MSPS 。ADC 部分提供 16 路采集通道，通道共享，可实现对 16 路单端信号或 8 对差分信号的采集；输入前端采用模拟开关进行输入通道的切换；采用一片高精度的 ADC 转换芯片，分辨率 18 bit，转换速率最高为 1.25 MSPS ；输入量程包括 $\pm 10\text{ V}$ 、 $\pm 1\text{ V}$ 、 $\pm 100\text{ mV}$ 等 3 种。

本测试系统数据采集模块中，通道采集电压范围设置为一 $10\text{ V} \sim +10\text{ V}$ ，每块采集板卡的 16 通道总采样率设置为 1 KHz （每通道采样率为 16 KHz ），8 块采集板卡并行工作，满足火工负载切换信号的采集性能要求。

1.2 指令控制模块硬件设计

指令控制模块按照用户要求以循环或指定模式向被测设备发送 OC 指令，且最大可支持 64 通道指令同时输出，每通道吸收电流不超过 300 mA 。本系统的指令控制模块中，共设计 64 通道 OC 指令输出能力，且每通道支持指令独立通道设置，适应被测设备不同的测试模式对指令输出的要求，增强设备通用化及适应性设计。

考虑通道数量、通用化及适应性等，本系统的指令控制模块采用一块 PXI-3305 来实现。PXI-3305 提供 64 个 OC 门形式的指令输出通道，每通道可独立配置，同时每通道的吸收电流能力可达 1 A ，满足火工负载指令控制的要求。指令控制模块 OC 指令输出硬件原理如下图所示。

1.3 传输及处理模块硬件设计

传输及处理模块负责数据的传输功能及处理功能，分别由 PXI 机箱及 PXI 处理器板卡实现。

数据传输功能由 PXI 机箱实现，支持 4U 共 14 个插槽，其内部背板 PXI 总线最大数据传输速率可达 132 MB/s ，本测试系统 128 通道每秒共采集约 800 kB 的数据量并需要进

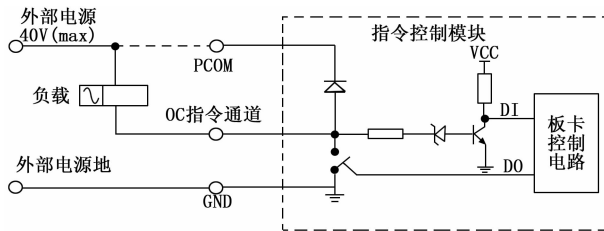


图2 指令控制模块 OC 指令输出硬件原理图

行传输，可满足高速多通道并行采集对于数据传输的需求。考虑外部电源与被测设备之间供电安全性，PXI 机箱实现外部 AC 电源与内部板卡 DC 电源的隔离。

数据处理功能由 PXI 处理器板卡实现。该 PXI 处理器板卡是整个测试系统的控制中心，运行整个测试系统软件并控制数据采集模块及指令控制模块，共同实现数据采集控制、数据实时显示、数据存储、数据回放及指令控制功能。同时，提供外部扩展接口，包括网络接口、USB 接口、HDMI 显示接口等。

1.4 显示操作模块硬件设计

显示操作模块提供界面显示、配置输入，由必要的液晶显示器、键盘及鼠标实现。

2 系统软件设计

LabVIEW 是一种面向对象的图像化编程语言，采用数据流编程方式，程序框图中节点之间的数据流向决定了虚拟仪器 VI 及函数的执行顺序。LabVIEW 具有庞大的函数库，包括数据采集、数据分析、数据显示及数据存储等，可大大提高系统开发效率，广泛应用于数据采集系统的开发。本系统软件在硬件架构平台上基于 LabVIEW 2015 开发，实现多通道高速数据采集、实时显示、存储回放、指令控制功能，并实现网络接入及远程控制功能。

根据功能划分，系统软件由数据采集模块、实时显示模块、存储回放模块、指令控制模块、远程控制模块等软件功能模块组成，系统软件架构及信息流如图 3 所示。

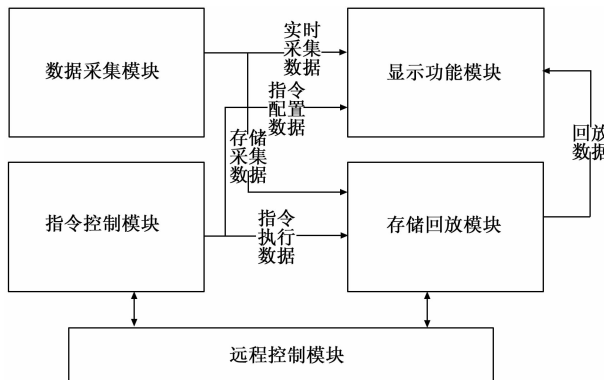


图3 系统软件架构及信息流图

系统软件各模块软件功能设计如下：

1) 数据采集模块软件功能。

该软件功能模块实现对 8 块数据采集板卡进行周期性采集控制，控制数据采集板卡进行按照设定采样率进行数

据采集, 控制采集板卡与 CPU 板卡之间的数据采集及传输控制。同时, 支持用户通过显示功能模块进行板卡选择、板卡数据显示模式等配置。

2) 指令控制模块软件功能。

根据测试需求提供指令相关配置功能, 包括指令发送模式、脉宽设置、时间间隔等, 并根据指令配置情况进行响应 OC 指令的发送控制, 包括指定发送模式及循环发送模式。

3) 存储回放模块软件功能。

对采集控制功能模块采集到的数据进行存储, 对指令配置功能模块成生的已执行执行信息进行存储。同时, 对已经存储的数据按照界面配置的回放条件进行数据回放。

4) 显示功能模块软件功能。

为数据采集模块、指令控制模块、存储回放模块提供本地化的人机交互界面, 提供数据显示及功能配置功能。

5) 远程控制模块软件功能。

远程控制模块为用户提供远程测试控制功能, 增加系统适应性, 为本测试系统接入高一级测试系统提供扩展接口。

2.1 数据采集模块软件设计

数据采集模块是系统软件中最为关键的软件模块, 实现最大 128 通道高速并行采集控制。控制数据采集板卡进行按照指定采样率进行数据采集及处理, 控制采集板卡与处理器之间数据采集控制。同时, 支持用户通过实时显示模块进行板卡选择、板卡数据显示等配置。

该软件模块控制每块板卡进行前端数据采集、板卡内暂存处理、数据传输等, 采集电压范围默认为 $-10\text{ V} \sim +10\text{ V}$, 同时可配置为 $-5\text{ V} \sim +5\text{ V}$ 、 $-1\text{ V} \sim +1\text{ V}$ 。128 通道总采样率设计为 1 KHz, 由于每块板卡中的 16 个通道是共享 AD 架构, 每通道实际采样率设置为 16 KHz, 每通道采样数设置为 $100^{[5]}$ 。

通过数据采集模块控制, 每块板卡采集满 16×100 的双精度浮点数据暂存在块板卡内存储区域中, 同时该板卡请求处理器读取板卡采集的数据, 处理器读取板卡的数据后, 板卡继续进行数据采集及暂存。处理器当收到多个板卡读取请求时, 按照时间先后顺序依次响应。数据采集模块软件处理流程如图 4 所示。

考虑到在短时间内获取到八块数据采集板卡共计 128 个通道的全部数据, 数据量很大, 为提高数据读取速度, 八块数据采集板卡和处理器板卡之间采用 DMA 直接内存存取的读取方式^[6]。同时, 为避免数据采集流程采集进入死循环, 软件处理流程中采取了每次采集读取一次后就要去检测是否有停止指令的处理策略, 这样避免了数据采集进入到死循环中, 也方便系统及时读取到新的用户配置指令进而及时及时进行状态转换^[7]。

2.2 显示功能模块软件设计

显示功能模块软件根据显示区域划分及相应显示功能需求, 通过调用 LabVIEW 前面板控件及相应函数库实现,

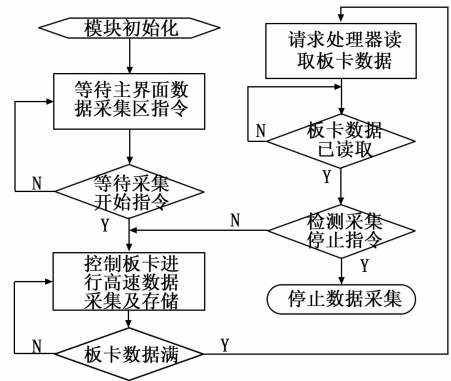


图 4 数据采集模块软件处理

为数据采集模块、存储回放模块、指令配置模块等提供人机交互界面, 为用户显示及配置功能。显示功能模块包括显示主界面和回放界面两部分。

2.2.1 显示主界面设计

显示主界面如图 5 所示, 包括数据采集区、指令发送区、数据显示区、其他指令区。具体显示功能设计如下:

1) 数据采集区。

板卡选择控件组主要是基于用户应用数采板卡的数量, 提供了工作板卡选择及配置功能, 可以选择应用其中一块或几块板卡的进行工作, 默认 8 块板卡均工作。采集状态指示控件是直观的提醒测试人员的板卡实时的工作状态。开始采集和停止采集控件是便于测试过程中发出启动采集和停止采集指令。

2) 指令发送区。

指令发送区提供指令发送模式选择、指令发送参数配置、指令发送过程标志、通道选择等功能,

3) 数据显示区。

数据显示区实现 1 块板卡共 16 个通道的数据实时显示功能, 显示形式为数值形式。同时, 支持用户选择实时显示板卡。

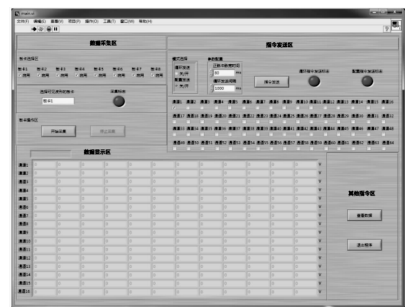


图 5 显示主界面

2.2.2 回放界面设计

回放界面为用于提供波形方式的回放显示模式, 同时提供回放板卡、回放通道、回放模式、波形查看、波形缩放等用户配置及操作功能。回放界面如图 6 所示。

回放功能中的波形显示区域中设计了多种波形查看功能, 包括用户可以选择当前选择板卡的任意单通道或多通

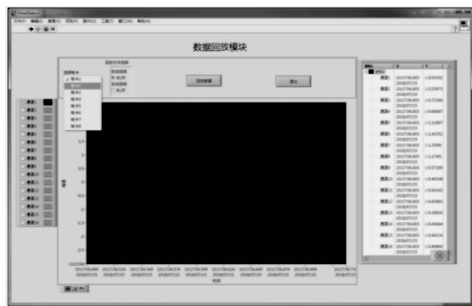


图 6 数据回放界面

道的数据显示, 波形的局部放大或缩小, 波形的上下和左右拉伸等。

2.3 存储回放模块软件设计

2.3.1 存储功能设计

1) 板卡数据存储设计。

板卡数据存储区设计为 $16 \times 100 \times 8$ 字节数组的存储空间。数据采集模块控制板卡各通道采集数据及处理后, 按照通道号进行相应存储。

2) 处理器数据存储设计。

处理器接收数据采集模块的数据, 除根据用户需求实时数值显示外, 所有数据同步进行存储。本系统 128 通道高速并行存储的数据能力必须在 800 KB/秒以上, 采集数据量大、速率高, 处理器数据存储采用 TDMS 文件格式实现高速数据读写^[8-9], 由于存储速度极快, 因此不会影响到数据采集的流程。每块采集板卡每采集完成一次生成一个 TDMS 数据文件。本软件系统生成的 TDMS 数据文件包含测试日期、板卡编号、采集通道等信息, 其中的信息可通过 Excel 打开及读取, 方便测试数据的查看、分析及再处理。

2.3.2 回放功能设计

回放功能基于处理器生成的 TDMS 数据文件, 默认回放本次最近一次采集的全部数据, 对象为指定板卡的全部 16 通道数据。回放模式包括自动回放和手动回放 2 种。自动回放模式下, 程序自动选择用户所选的回放板卡存储数据的最新的一个数据文件进行回放; 用户选择文件回放模式下, 提供给用户一个默认路径为用户所选的回放板卡的数据存储路径, 方便用户进行选择。

回放功能模块软件流程如图 7 所示。

回放功能中的波形显示控件提供多种便捷功能, 包括用户可以选择当前选择板卡的任意单通道或多通道的数据显示, 波形的局部放大或缩小, 波形的上下和左右拉伸等功能。

2.4 指令控制模块设计

指令控制模块为用户提供最大 64 通道的 OC 门指令发送及控制能力。指令发送模式、脉宽设置、时间间隔可根据用户界面配置情况进行相应 OC 指令的发送控制。指令控制模块软件默认设置指令板卡的初始化状态为对外输出高组态, 每通道指令有效时间宽度为 80 ms, 每通道指令有效

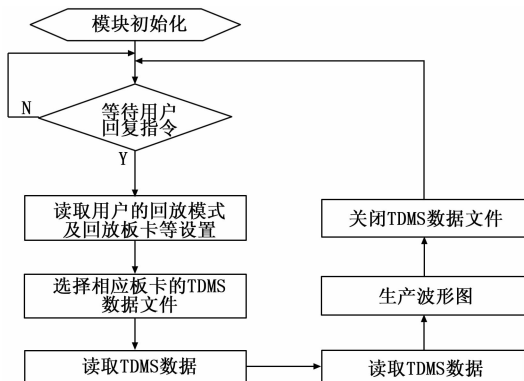


图 7 回放功能模块软件处理

时间宽度可根据用户需求调整。

为适应多种测试模式需求并增加通用性设计, 指令控制模块的指令发送模式设计循环发送模式和指定发送模式。

1) 循环发送模式。

默认循环发送通道时间间隔为 1 s (通道时间间隔可调), 64 通道 OC 门从第 1 通道开始, 间隔 1s 依次发送全部指令通道。同时, 将已发送的指令通道信息、发送时间信息进行存储。

2) 指定发送模式。

通过主界面中的指令发送区, 选择指定发送的通道, 可以是 64 通道中的任一个或几个通道。指令控制模块根据用户界面配置的发送模式, 将指定通道一次性同时发送。同时, 将已发送的指令通道信息、发送时间信息进行存储。

指令控制模块软件流程如图 8 所示。

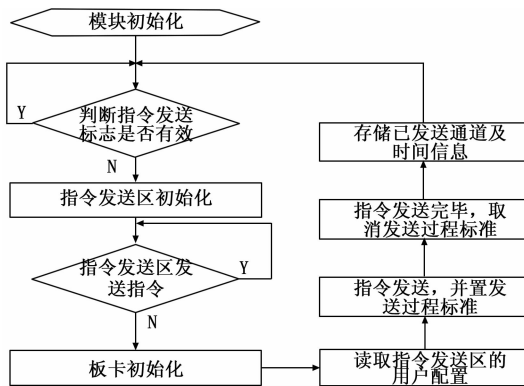


图 8 指令控制模块软件处理

在 2 种指令发送模式中, 指令控制模块软件中均设计了防误操作安全措施。为避免在指令发送过程中的人为误操作而导致的指令发送错误, 在指令真正发送之前, 对指令发送过程标志进行判别, 若指令发送过程标志有效, 说明上一次指令发送尚未完成, 本次操作不能真正触发指令发送, 必须等待指令发送标志无效后再次发送。即上一次指令完全发送完毕后才可配置并发送下一轮指令, 同时对正在发送指令的进行进行保护, 确保误操作的配置不对正在发送中进程造成影响。

(下转第 69 页)