

基于虚拟仪器和 PXI 总线的电磁阀控制系统研制

张卫东, 李 力, 张茂森, 尹健昭, 徐亚敏

(北京航天动力研究所, 北京 100076)

摘 要: 为满足姿轨控火箭发动机快响应电磁阀的高精度脉冲控制需求, 研制了一套基于虚拟仪器和 PXI 总线的脉冲控制系统。该系统选用成熟 PXI 总线硬件平台, 设计可靠的电磁阀驱动电路, 在 LabVIEW 图形化编程环境中完成控制软件的设计开发。经过全面的系统测试和验证后, 控制系统多次应用于发动机地面试验中, 表现出性能优良、可靠性高的特点, 实现了快响应电磁阀的高精度脉冲控制。

关键词: 快响应电磁阀; 虚拟仪器; PXI 总线; 脉冲控制系统

中图分类号: V434-34 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9374 (2015) 01-0112-05

Development of solenoid valve control system based on virtual instrument and PXI bus

ZHANG Wei-dong, LI Li, ZHANG Mao-sen, YIN Jian-zhao, XU Ya-min

(Beijing Aerospace Propulsion Institute, Beijing 100076, China)

Abstract: To meet the high-accuracy pulse control demands of fast response solenoid valves in an attitude and orbit control system, a pulse control system based on virtual instrument and PXI bus was developed. The mature hardware platform of PXI bus was adopted in the control system. The reliable drive circuit for solenoid valves was designed. Design and development of the control software were accomplished in the LabVIEW graphic programming environment. After comprehensive test and verification, the control system was used in rocket engine ground test for several times. The test result shows the system has excellent performance and high reliability, which achieves high-accuracy pulse control of fast response solenoid valves.

Keywords: fast response solenoid valve; virtual instrument; PXI bus; pulse control system

0 引言

在空间飞行器研制中, 广泛采用了高性能、轻量化、快响应的姿轨控火箭发动机。姿轨控火

箭发动机通常以脉冲方式工作, 实现飞行器的精确姿态调整或轨道修正。其中, 可重复工作、快响应的电磁阀能保证姿控、轨控发动机开机、关机的快速响应能力, 提高飞行过程调姿、变轨的

收稿日期: 2014-08-13; 修回日期: 2014-08-26

作者简介: 张卫东 (1982—), 男, 助理工程师, 研究领域为火箭发动机地面试验测控技术

准确性和机动性, 是姿轨控发动机的关键技术之一。准确获得快响应电磁阀在高速脉冲工作时打开、关闭的性能参数, 对于姿轨控发动机的研制具有极为重要的意义。姿轨控火箭发动机快响应电磁阀一般工作脉冲为毫秒级, 要求系统控制精度达到 $\pm 0.1\text{ ms}$, 发动机电磁阀控制通道不少于 10 路, 具备读取仿真飞行指令字文件的能力。为了实现快响应电磁阀的高速打开、关闭控制, 需要研制一套精度高、操作简便、可靠性高的电磁阀脉冲控制系统。

为适应复杂的外场使用环境, 电磁阀控制系统充分利用软件与硬件相结合的虚拟仪器技术, 选用当前主流的 PXI 总线硬件平台, 采用模块化设计方案, 根据实际试验需求来定义和设计仪器的测量和控制功能。

1 技术要求

作为姿轨控发动机地面控制设备, 快响应电磁阀控制系统应具备单路、多路的高精度脉冲输出和优良的电磁阀驱动能力, 同时为适应各种场合的试验使用要求, 还要具备良好的便携性和人机交互界面。因此, 设计的控制系统应满足如下技术要求:

- 1) 控制输出电压: 27_{-3}^{+4} V ;
- 2) 控制回路电流: $\geq 1.5\text{ A}$;
- 3) 控制系统通道: ≥ 20 路;
- 4) 定时时钟基准: 0.25 ms , 0.5 ms , 1 ms , 2 ms , 2.5 ms , 5 ms ;
- 5) 脉冲控制精度: $\pm 0.1\text{ ms}$;
- 6) 结构坚固, 便携性好。

2 系统组成及硬件设计

2.1 系统组成及工作原理

快响应电磁阀控制系统由 PXI 机箱、嵌入式控制器、数字波形发生器、电磁阀驱动电路、显示器、键盘和鼠标等组成。为验证电磁阀控制系统控制精度, 采用瞬态记录仪实时监测、记录电磁阀工作过程。系统原理图如图 1 所示。

快响应电磁阀控制系统工作原理如下: 直流

稳压电源为电磁阀驱动电路和电磁阀提供工作电源; 根据火箭发动机控制系统的试验任务要求, 编写脉冲控制字符串并转换成指令字, 下载至数字波形发生器中; 数字波形发生器输出控制信号给电磁阀驱动电路, 控制电磁阀打开、关闭, 实现对各路电磁阀的高精度脉冲控制, 同时瞬态记录仪对电磁阀工作电流曲线进行高速数据采集。

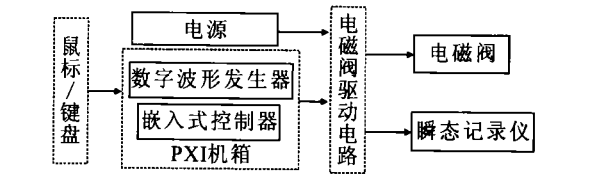


图 1 快响应电磁阀控制系统原理图
Fig. 1 Functional block diagram of control system for fast response solenoid valve

2.2 PXI 系统硬件配置

PXI 系统硬件由机箱、嵌入式控制器和数字波形发生器等组成, 具体配置和技术参数见表 1。

表 1 PXI 系统硬件配置

Tab. 1 Hardware configuration of PXI system

名称	型号	技术参数
机箱	PXI-1031	4 槽 PXI 机箱, 背板带宽为 132 MB/s, 内置 10 MHz 系统参考时钟, 能够满足高级定时和同步需求
嵌入式控制器	PXI-8108	集成酷睿 II 2.53 GHz CPU, DDRII 1G 内存和 150 G 硬盘
数字波形发生器	PXI-6542	基于板载高精度时钟和高性能 FPGA 器件, 提供 32 路高速数字通道, 最大时钟频率为 100 MHz, 每通道配置 8 Mb 的板载内存, 具备 3.3 V, 32 mA 的直流驱动能力

采用上述硬件配置的 PXI 系统具备以下优点: 拥有工业控制计算机的运行稳定性, 结构更坚固, 便携性更好, 适合外场使用; FPGA 器件的应用大大提高了系统的性能, 指令字下载至数字波形发生器后依靠硬件定时, 解决了 Windows 非实时、多任务系统定时精度差的问题; 选用成熟的 PXI 总线硬件模块, 基于虚拟仪器进行软件

开发,难度适中,研制周期短,人机交互界面友好。

2.3 驱动电路设计

为保证发动机开机、关机的快速响应能力,电磁阀的吸合和释放过程要非常快,这除了与电磁阀本身特性有关外,还和电磁阀驱动电路的设计有很大关系。快响应电磁阀核心部分为螺线管式直流电磁铁,主要由电磁导体、线圈、弹簧和衔铁等组成,具有感性负载的工作特性。快响应电磁阀的释放作用力是由弹簧产生的,所以电磁铁必须要在很短的时间内产生很强的吸力来克服弹簧力。因此,驱动电路应该具备如下特性:在打开时驱动电压应有陡峭的上升沿,向电磁阀线圈快速注入驱动电流,使其迅速吸合;在电磁阀释放时,尽快切断驱动电流。

为充分满足快响应电磁阀控制的技术要求,电磁阀驱动电路选用 0~35 V 做为电路的驱动电压,最大工作电流 5 A,控制精度 μs 级。根据快响应电磁阀的驱动要求,采用 MOSFET 作为功率开关器件,利用高速光耦 6N137 和专用驱动芯片 UCC27321 组合构成了一种新颖的电磁阀驱动电路,该驱动电路具有外围器件少,开关速度快,电路简单可靠的优点。

功率开关 MOSFET 具有输入阻抗高、驱动功率小、开关速度快、功率增益高、无二次击穿现象和安全工作区域宽等优点,在驱动电路中能够提高快响应电磁阀的打开和关闭速度。为了提高系统安全裕度, MOSFET 选用 IR 公司的 IRF1010,其漏源电压 V_{DS} 为 60 V,漏源电流 I_D 为 84 A,远高于设计值,导通延迟时间 $t_{d(on)}$ 为 12 ns,关断延迟时间 $t_{d(off)}$ 为 48 ns,而且导通电阻 $R_{DS(on)}$ 仅为 0.012 Ω ,可以确保控制系统的快速响应能力和安全可靠。

选用高速光耦 6N137 匹配 PXI 系统输出接口,使驱动电路的输入和输出在电气上相互隔离。6N137 转换速率高达 10 MBit/s,隔离电压 2 500 V,输入电流 5 mA,最大电源电压 5.5 V,上升时间 50 ns,下降时间 12 ns,能够保证驱动脉冲的上升沿和下降沿的陡度。

MOSFET 属于电压控制型器件,其输入阻抗

高,所需静态驱动功率很小。然而,由于各极之间存在着寄生电容,在导通和关断过程中,特别是在高频率应用中,驱动电路必须能够对其寄生电容进行快速充/放电。选用 TI 公司生产的 MOSFET 专用驱动芯片 UCC27321,该芯片通过少量的外围元件,就可以实现简单高效的 MOSFET 驱动电路。UCC27321 带有使能控制功能, TTL 和 CMOS 电平输入,输出端采用了独特的双极性晶体管图腾柱和双 MOSFET 图腾柱的并联结构,能在几百纳秒的时间内提供高达 9 A 的峰值电流并使得有效电流源能在低电压下正常工作,能够快速驱动功率 MOSFET,在关断瞬时提供较大的反压,使 MOSFET 快速、可靠关断。在 10 nF 的负载下,其上升时间和下降时间典型值仅为 20 ns。工作电压为 4~15 V,工作温度范围为 -40~+105 $^{\circ}\text{C}$ 。

快响应电磁阀为感性负载,由于关闭速度快,当电压突然关闭时,线圈两端将产生几百伏以上的高压反电动势,该高压反电动势可能会造成功率 MOSFET 的过压损坏,同时会导致较大程度的电磁干扰,在电路设计中采用快恢复二极管 FR107 与电磁阀线圈反向并联的设计思路,提供电磁阀线圈电流的快速泄放通道,提高驱动电路工作的可靠性。同时,为了获得电磁阀的工作电流,在功率 MOSFET 源极与电源负端串联了一个 0.25 Ω 的大功率、高精度采样电阻。

该驱动电路结构简单,与 PXI 系统输出接口匹配良好,性能可靠,驱动能力强,并能够在电磁阀动作的瞬间起到良好的过压保护功能,最高工作频率达到 100 kHz 以上,具备了快响应电磁阀高速脉冲动作的驱动能力。

3 系统软件设计

3.1 软件需求分析

软件设计是快响应电磁阀控制系统的核心环节。根据电磁阀地面试验的控制要求,控制系统软件应具备良好的硬件接口和友好的人机界面,运行稳定、可靠。经过梳理分析,快响应电磁阀控制系统软件需求如下:

- 1) 手动控制电磁阀打开、关闭;

- 2) 按照控制指令字时序自动打开、关闭电磁阀;
- 3) 能够接收外部触发信号输出控制指令字;
- 4) 可以将固定格式的脉冲字符串转换为指令字文件;
- 5) 能够对指令字文件进行统计;
- 6) 能够显示指令字文件的数字波形。

3.2 软件体系结构及流程图

根据系统软件需求进行软件整体设计, 软件结构分为 3 个功能模块, 包括手动控制模块、指令控制模块和文件处理模块, 系统功能模块构成见图 2。系统软件主要由底层控制程序和用户操作前面板开发完成。目前使用最多的虚拟仪器软件开发平台是 NI 公司的 LabVIEW 平台, 它是完全图形化的开发工具, 具有使用方便、易于学习等特点, 同时提供了丰富的人机界面开发控件和成熟稳定的 PXI 硬件驱动接口。本系统软件开发使用 LabVIEW2010, 软件运行平台为 Windows XP。

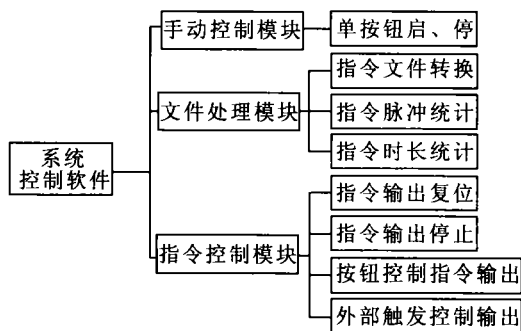


图 2 软件功能模块图

Fig. 2 Block diagram of software function modules

控制系统软件启动后, 进行控制方式选择, 根据电磁阀的控制要求进入相应人机控制界面。通过点击手动控制界面或指令控制界面上的功能控制按钮, 完成相应的电磁阀开关动作。

3.3 虚拟仪器界面设计

快响应电磁阀控制系统软件针对不同的功能需求, 编写多个功能不同的程序子模块, 虚拟仪器界面通过调用不同功能的子模块来实现用户的控制和显示功能。该系统虚拟仪器界面包括手动控制操作界面和指令控制操作界面。

手动控制操作界面共布置 32 个虚拟控制按钮和指示灯控件, 分别对应数字波形发生器的 32 个物理通道。在该界面上, 用户使用鼠标点击虚拟控制按钮, 控制数字波形发生器相应通道的高、低电平输出状态。同时, 指示灯控件显示硬件通道的输出状态。手动控制操作界面的设计实现了电磁阀的手动控制功能。

指令控制操作界面共布置指令数字波形图表、指令脉冲个数、指令字文件总时长、已输出时间、输出状态等显示控件, 以及指令控制输出、停止、复位、指令字文件的转换等功能按钮。在该界面上, 用户通过键盘和鼠标能够实现指令字文件的处理和控制指令输出等操作功能。

3.4 虚拟仪器程序框图设计

虚拟仪器程序采用模块化的子 VI 调用方式运行, 在应用程序主界面循环侦听用户的操作事件 (鼠标、键盘操作等)。当侦听到操作界面事件发生, 则调用相关的功能模块进行事件响应, 完成快响应电磁阀控制系统软件的各项功能。虚拟仪器程序框图设计主要包括手动控制程序框图、指令控制程序框图和文件处理程序框图。

手动控制程序框图实现了通道选择和手动控制信号输出等功能。该程序框图在运行过程中调用数字波形发生器驱动程序, 同时循环侦听操作界面的响应事件, 并将事件响应信号发送至数字波形发生器输出模块, 以完成电磁阀的手动控制动作。

指令控制程序框图和文件处理程序框图根据指令控制操作界面设计思路, 分别开发指令控制程序模块和文件处理程序模块。指令控制程序模块实现了指令文件下载、外部触发控制输出、虚拟按钮控制输出、输出停止和程序复位等功能。其中, 指令文件下载模块循环侦听指令操作界面的操作事件, 调用数字波形发生器数据下载模块, 自动将包含 0、1 的指令文件下载到数字波形发生器的板载内存中。同时循环侦听操作界面上“输出”按钮动作的操作事件, 调用数字波形发生器的数据输出模块, 完成电磁阀的指令控制动作任务。文件处理程序框图通过循环侦听操作界面上的文件处理操作事件, 调用数据报表功能

模块，实现指令字文件的转换、统计和复制等功能。

4 系统测试及分析

该控制系统完成研制后，为了确保在姿轨控火箭发动机地面试验中的控制精度、可靠性以及稳定性，进行了大量的系统硬件测试、软件测试以及联合调试工作。在控制系统通过了电磁阀模拟负载的测试后，连接了真实的快响应电磁阀进行系统测试。选用 GEN5i 瞬态记录分析仪进行控制指令信号、电磁阀电流信号采集，采样速率为

1 MS/s。通过对采集数据进行分析得出：电磁阀的打开、关闭表现出极好的同步性和控制精度，但在 1 MS/s 的采样速率下，仍然无法判读 1 μs 以内的延时时间和脉冲定时宽度误差。

为进一步分析控制系统的控制精度，采集设备选用 Tektronix TMS320 示波器进行控制指令信号、电磁阀电流信号采集，采样速率为 20 MS/s，系统测试数据见表 2。通过分析测试数据，该系统控制精度优于 μs 级，充分满足设计技术指标中±0.1 ms 的控制精度要求，具备了对快响应电磁阀进行高速脉冲控制的能力。

表2 控制系统测试数据
Tab. 2 Test data of control system

ns			
采集信号	符号	参数	测量值
控制指令信号	t_r	上升时间	50
	t_f	下降时间	50
电磁阀电流信号	$t_{d(on)}$	导通延迟时间	630
	$t_{d(off)}$	关断延迟时间	120
	t_f	下降时间	540

5 结论

快响应电磁阀控制系统研制成功后，已经多次应用于姿轨控火箭发动机地面试验中，取得了良好的使用效果。实际应用表明，系统结构简单，性能优良，便携性好，充分满足了外场试验中快响应电磁阀的脉冲控制需求。而且，采用模块化设计的控制系统可扩展性强，具有很高的实际应用和推广价值。

参考文献：

[1] 樊水康, 郭会兵, 刘巍. PXI 计算机在一体化多模式发控系统中的应用[J]. 火力与指挥控制, 2013, 38(7): 138-140.
[2] 陈远, 肖兵. 基于 DSP 的喷油器电磁阀驱动电路设计[J]. 计算机测量与控制, 2012, 20(4): 1054-1057.

[3] 李金飞, 秦海鸿, 戴卫力, 等. 基于光耦 HCPL4504 和专用芯片 UCC27321/2 的游艇电机驱动电路设计[J]. 电源世界, 2008 (7): 63-66.
[4] 沈福东. 浅谈直流感性负载消除反电动势电路设计[J]. 科技创新导报, 2012 (15): 55-55.
[5] 封锡凯, 李伟, 李辉. 电磁阀启闭特性非接触测量方法研究[J]. 火箭推进, 201, 37(3): 65-67.
[6] 董铸荣, 梁松峰, 贺萍. 基于虚拟仪器的汽车变速器计算机测控系统的设计[J]. 微计算机信息. 2012, 28 (5): 31-33.
[7] 侯国屏, 王坤, 叶齐鑫. LabVIEW7.1 编程与虚拟仪器设计[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
[8] 张海藩. 软件工程导论[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
[9] 王兆安, 黄俊. 电力电子技术 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2002.
[10] 包尔恒. MOSFET 驱动电路分析与设计[J]. 通讯电源技术, 2013, 30(2): 34-37.

(编辑：王建喜)