

# 一种姿轨控发动机地面试验控制系统设计

刘万龙<sup>1</sup>, 牛向楠<sup>1</sup>, 李全令<sup>2</sup>, 韩晓梅<sup>1</sup>, 孙树江<sup>1</sup>

(1. 北京航天试验技术研究所, 北京 100074; 2. 北京中科泛华测控技术有限公司, 北京 100192)

**摘要:** 控制系统在试车过程中发出指令信号, 使发动机和试车台各工艺系统按照预定的程序完成规定试车任务。为了适应某型号姿轨控发动机试验对控制精度要求的提高, 需要对现有控制系统进行改造, 基于现场可编程门阵列和高速固态继电器设计了一种新的控制系统, 其控制模块用于操作人员对试验系统上的各路电磁阀进行手动与自动控制, 其复记模块可以实时记录系统状态以便于指挥人员了解系统工作状况, 并能够进行数据分析判断。该系统建成后可以满足该型号姿轨控发动机试验的要求, 控制精度为 0.1 ms。

**关键词:** 火箭发动机; 地面试验; 控制系统

**中图分类号:** V433.9-34 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9374 (2015) 02-0114-04

## Design of a ground test control system for attitude and orbital control engine

LIU Wan-long<sup>1</sup>, NIU Xiang-nan<sup>1</sup>, LI Quan-ling<sup>2</sup>, HAN Xiao-mei<sup>1</sup>, SUN Shu-jiang<sup>1</sup>

(1. Beijing Institute of Aerospace Testing Technology, Beijing 100074, China;

2. Beijing Zhongke Fanhua Measurement & Control Technology Co., Ltd, Beijing 100192, China)

**Abstract:** In the test, the control system gives command signal to make the engine and test process systems complete a predetermined test task according to certain procedures. In order to adapt to the high-accuracy control requirement of a new attitude and orbital control engine, it is necessary to improve the existing control system. Therefore, a new control system was designed based on field programmable gate array and high-speed solid-state relay. Its control module can be used for operators to control various electromagnetic valves in the test system manually and automatically. Its record module can be used to record the status of the system, so that the command staff know the working status of the system. The system can meet the testing requirements of the new attitude and orbital control engine. The control precision is 0.1 ms.

**Keywords:** rocket engine; ground test; control system

收稿日期: 2014-10-07; 修回日期: 2014-12-12

作者简介: 刘万龙 (1982—), 男, 博士, 工程师, 研究领域为火箭发动机试验及测试技术

## 0 引言

液体火箭发动机是航天工程中最重要和主要的动力来源, 在其研究和设计中, 地面试验起着关键的作用<sup>[1]</sup>。控制系统在试车过程中发出指令信号, 使发动机和试车台各工艺系统按照预定程序完成规定的试车任务, 所以要求控制系统有很高的可靠性、稳定性和控制精度。

试验中的控制系统主要完成点火、启动、关机的时序控制、突发情况下系统状态调整及紧急关机等任务。随着液体火箭发动机技术的不断提高, 发动机工作过程更加复杂, 工作中要求依次控制十几至几十个甚至更多控制元件正确工作, 并且要求试验中对试验的时序进行灵活而可靠的控制。可编程控制器通过开关量逻辑控制指令, 简捷地实现继电器电路的功能及精确的延时。目前许多发动机试验测控系统广泛应用可编程控制器进行控制<sup>[2-4]</sup>, 但普通 PLC 的定时器最小时间间隔为 1 ms, 而未来姿轨控发动机试验要求控制系统能达到 0.1 ms 甚至更高的控制精度, 这就需要具有更高控制精度的设备。

现场可编程门阵列 (Field-Programmable Gate Array, FPGA) 是集成电路领域中的一种半定制电路, 它既解决了定制电路的不足, 又克服了原有可编程器件门电路数有限的缺点, 而且时间控制精度更高, 可以实现纳秒级甚至更高的时间控制精度<sup>[5-6]</sup>。可以说 FPGA 芯片是提高系统集成度、可靠性的最佳选择之一。近年来, FPGA 在航天领域的控制系统中也得到了较多应用<sup>[7-8]</sup>。本文基于 FPGA 和高速固态继电器设计了新的姿轨控发动机试验控制系统, 所选用的 FPGA 模块时间控制精度为 25 ns, 固态继电器开关切换时间为 50  $\mu$ s。

## 1 系统用途

本控制系统用于操作人员对试验系统上的各路电磁阀进行手动与自动控制, 采用 PXI 平台, 利用两块 FPGA 模块来分别控制电磁阀的动作序列和监控电磁阀的控制信号状态, 实现某型号姿

轨控发动机试验系统的控制和监控, 控制精度为 0.1 ms。其复记模块可以实时记录控制系统状态, 便于指挥人员了解被控对象的工作状况, 并能够进行数据分析和判断。

### 1.1 控制模块

姿轨控发动机管路系统简图如图 1 所示, 包括氧化剂舱上阀、氧化剂吹除阀、氧化剂清洗阀、燃料舱上阀、燃料吹除阀、燃料清洗阀、发动机燃料阀、发动机氧化剂阀及管路等。其中舱上阀、吹除阀、清洗阀为单稳阀; 发动机燃料阀、发动机氧化剂阀为双稳阀。控制模块能够同时控制 16 个通道的开断, 包括 4 通道发动机电磁阀 (2 个双稳阀)、6 通道工艺阀 (单稳阀)、1 个数字量输出通道 (试验启动信号 V0)、5 个备用通道。这 16 个通道的开关时序可由用户通过程序来设定, 其控制精度为 0.1ms。在控制模块中设置 4 个通道电流检测的接口, 在每个通道上串联 1 个 0.5  $\Omega$  的采样电阻, 这样可以将发动机电磁阀的电流转换为电压, 通过光电隔离模块将电压值隔离输出。这 4 个通道各提供 2 个采集接口: 一个接入复记模块, 用于指挥人员的现场判读; 另一个接入试验采集系统, 作为试验数据进行存储。

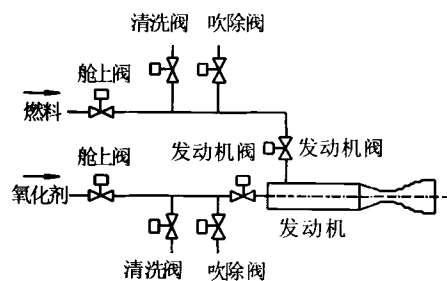


图 1 姿轨控发动机试验管路系统简图

Fig. 1 Diagram of pipeline system for attitude and orbital control engine test

### 1.2 复记模块

复记模块用来同时监测控制模块中的 4 个通道发动机电磁阀的阀电流以及另外 12 个通道的状态, 并将记录的状态保存到数据文件中, 以供后续的数据分析。

## 2 主要技术指标

### 2.1 控制模块

1) 16 路数字量输出。可通过编程控制 16 个通道, 包括 4 通道发动机电磁阀 (2 个双稳阀)、6 通道工艺阀 (均为单稳阀)、1 个启动信号 V0 (数字量输出通道)、5 个备用通道。

2) 通道配置。通道可通过软件配置为单稳阀或双稳阀; 当配置为双稳阀时, 启用相邻的两个通道为一个双稳阀控制通道。

3) 整个系统的控制精度优于 0.1 ms。所选的 FPGA 模块时间控制精度为 25 ns, 信号隔离放大电路响应时间约为 1  $\mu$ s, 固态继电器开关切换时间为 50  $\mu$ s。

4) 具有 4 个通道发动机电磁阀电流检测接口, 且每个通道均在面板上提供 1 个采样接口, 通过电压隔离模块输出 0~5 V 信号至试验采集系统。

5) 提供 8 个通道模拟量输入, 信号输入范围为 -10~+10 V, 可供后续扩展。

### 2.2 复记模块

1) 4 个通道模拟量输入, 用于采集控制模块中光电隔离模块输出的电磁阀电流。

2) 12 个通道数字量输入, 用于采集控制模块中 12 个数字量输出的控制信号。

## 3 系统工作原理及布局

控制模块采用上下位机通信方式: 上位机提供一个交互界面, 操作人员可以通过该界面设置每个控制通道的动作时序, 并将配置的参数通过 TCP/IP 通信传送至下位机; 下位机接收到启动命令后, 将配置的参数通过 FIFO 传输至 FPGA 模块, 直接操作 FPGA 硬件 I/O 资源。FPGA 的 I/O 发送 TTL 电平信号至信号隔离放大电路, 经过隔离放大后的信号传输至固态继电器, 控制固态继电器的工作, 实现对电磁阀工作回路的通断控制。

复记模块通过多功能 FPGA 的 I/O 口实时采集控制模块发出的控制信号状态, 通过模拟量输入通道采集 4 个通道的阀电流, 并将采集到的数据保存至硬盘。

### 3.1 系统框架

为了更好地满足系统对控制精度、动态跟踪分析等方面的要求, 在方案设计时, 控制模块选择采用实时 (RT) 操作系统 + Windows 操作系统的组合模式: 上位机采用 Windows 操作系统, 具有良好的人机界面; 下位机使用实时操作系统, 具有响应快、性能稳定、可靠性高、体积小特点。采用 RT+Windows 组合操作系统模式可充分利用 RT 系统的快速、稳定和 Windows 系统界面友好的特点, 既能很好地满足系统对实时性、稳定性、数据安全性等要求, 又能方便操作人员使用。复记模块采用 Windows 操作系统。选用的 FPGA 型号为 Virtex-5 LX50, 其具有 8 路模拟输入, 200 kHz 独立采样率, 16 位分辨率, 电压范围  $\pm 10$  V; 8 路模拟输出, 1 MHz 独立更新率, 16 位分辨率, 电压范围  $\pm 10$  V; 96 个数字通道, 可配置为速率高达 40 MHz 的输入、输出、计时器或自定义逻辑; 可通过 LabVIEW 的 FPGA 模块对 FPGA 进行编程。

固态继电器 (Solid State Relay, 缩写 SSR) 是用分离的电子器件、集成电路 (或芯片) 及混合微电路技术结合发展起来的一种具有继电器特性的无触点式电子开关<sup>[9-10]</sup>, 它与电磁继电器相比具有工作可靠性高、寿命长、抗干扰能力强和开关速度快的优点<sup>[10-11]</sup>。本方案选择美国快达 (Crydom) 公司的固态继电器 (开关切换时间为 50  $\mu$ s) 作为执行元件。

控制系统总体结构如图 2 所示, 试验系统中的电磁阀通过通用的接口线缆与机柜接口相连。在控制模块内部, 通过快速固态继电器来控制电磁阀回路的通断。通过屏蔽的双绞线缆将固态继电器的状态信号连接至复记模块进行数据采集。

### 3.2 发动机电磁阀控制原理

发动机电磁阀的控制回路和回路中电流检测电路如图 3 所示, 控制回路采用二级隔离放大电路来驱动控制发动机电磁阀和工艺阀的工作; 在回路中并入续流二极管保护电路, 可以防止电路中电压电流的突变, 为电磁线圈产生的反向电动势提供放电通路; 在回路中加入了保险丝, 可以避免电磁阀线圈端出现短路时, 出现控制电路和

电源被烧坏的现象; 电流采集接口中, 在 4 个发动机电磁阀控制回路中串入  $0.5\ \Omega$  的采样电阻, 这样可以将电流值转换成电压值, 通过光电隔离模块将电压值传输至面板接口, 同时将转换后的电压值输入到复记模块中的模拟量采集通道。

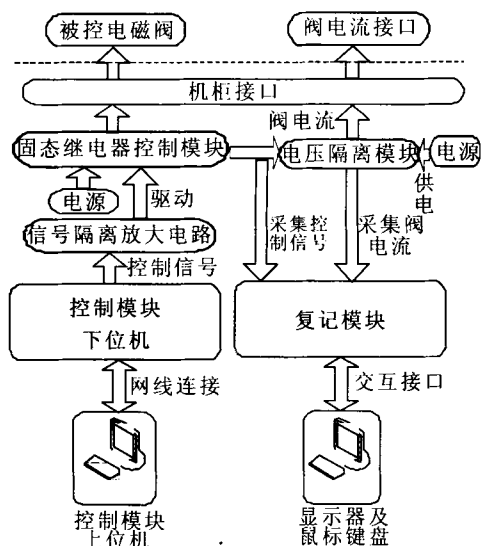


图 2 控制系统总体结构图

Fig. 2 Structure diagram of control system

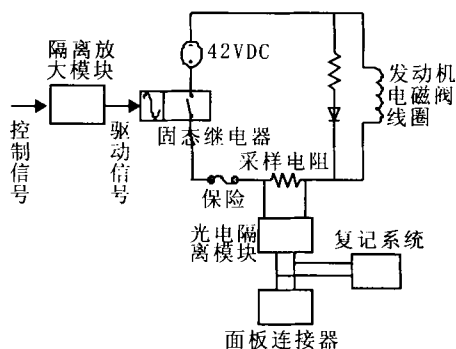


图 3 发动机电磁阀控制原理图

Fig. 3 Control principle diagram of engine solenoid valves

### 3.3 工艺阀控制及复记模块检测

复记模块中 12 个控制信号检测原理如图 4 所示, 在被控电磁阀 (工艺阀) 两端并联 1 只固态继电器和 1 只电阻, 用于将 27 VDC 电压转换为复记模块的采集模块可接收的 5 V 电压信号。当控制信号控制工艺电磁阀动作时, 在后面的固态继电器也会跟着动作; 同时固态继电器触点会将接入 5 VDC 的上拉电阻电位拉低, 此时复记模

块会采集到与控制信号相反的信号, 在复记模块的采集程序中对采集到的数据进行反逻辑运算即可得到控制信号。

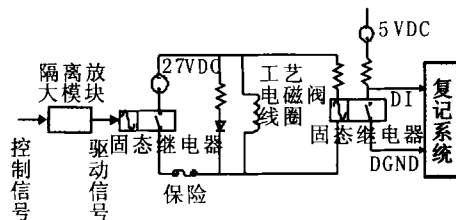


图 4 复记模块中控制信号检测原理图

Fig. 4 Detection principle of control signals from record module

## 4 抗干扰设计

控制系统工作时, 会受到来自周围环境和系统内部各种杂波的干扰, 干扰会严重影响控制系统的可靠性。因此, 抑制杂散信号对控制系统的干扰是非常重要的<sup>[1]</sup>。

为了抑制来自电源的干扰, 在每个设备的入口端匹配的低通滤波器, 并将供电电路同信号电路隔开, 减少耦合; 对模拟输入电路单独供电; 尽量使交流电源供电线及其回线绞合、直流电源供电线及其回线分别绞合在一起, 且不与其他电路回线共用一根导线。

通过设计良好的接地来抑制其他干扰, 信号回线、电源回线及机壳设置独立的接地, 并在同一参考点接地。对于输出的电压信号通过快速响应电压隔离端子进行隔离, 其输入电压 0~5 V, 输出电压 0~5 V, 采用 24 VDC 供电, 带宽频率为 10 kHz, 精度 0.3%, 其功能框图如图 5 所示, 可以实现输入、输出、电源三端口隔离。

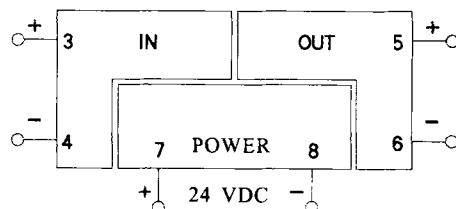


图 5 电压隔离模块功能框图

Fig. 5 Functional block diagram of voltage isolation module

(下转第 122 页)

## 参考文献:

- [1] 冯辅周, 司爱威. 故障预测与健康管理技术的应用与发展[J]. 装甲兵工程学院学报, 2009, 23(06): 1-6.
- [2] 张育林, 吴建军. 液体火箭发动机健康监控技术[M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 1998.
- [3] 代京, 张平, 李行善. 综合运载器健康管理健康评估技术研究[J]. 宇航学报, 2009, 30(4): 1711-1721.
- [4] 张振鹏. 液体火箭发动机故障检测与诊断中的基础研究问题[J]. 推进技术, 2002, 23(5): 353-359.
- [5] 夏鲁瑞. 液体火箭发动机涡轮泵健康监控关键技术及系统研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2010.
- [6] 杨小兵. 聚类分析中若干关键技术的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2005.
- [7] 章兢, 张小刚. 数据挖掘算法及其工程应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.
- [8] 刘红岩, 陈剑. 数据挖掘中的数据分类算法综述[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2002, 42(6): 727-730.
- [9] MARTIN RA, SCHWABACHER MA, MATTHEWS BL. Data-driven anomaly detection performance for the Ares I-X ground diagnostic prototype[R]. USA: NASA, 2010.
- [10] DAVID L I. Inductive monitoring system constructed from nominal system data and its use in real-time system monitoring, AIAA 2004-8062[R]. USA: AIAA, 2004.
- [11] 王莉. 数据挖掘中聚类方法的研究[D]. 天津: 天津大学, 2003.
- [12] IVERSON D L, MARTIN Rodney, SCHWABACHER Mark, et al. General purpose data-driven system monitoring for space operations[J]. Journal of Aerospace Computing, Information, and Communication, 2012, 9 (2): 26-44.
- [13] 袁志发, 宋世德. 多元统计分析[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [14] 杨沛武. PCA 多元统计方法在过程监控中的应用研究[D]. 苏州: 江南大学, 2008.

(编辑: 王建喜)

(上接第 117 页)

## 5 结 论

根据发动机设计部门对试验控制精度的要求, 进行了某型号姿轨控发动机控制系统的设计, 其控制模块用于操作人员对试验系统上的各路电磁阀进行手动与自动控制, 其复记模块可以实时记录系统状态以便于指挥人员了解系统工作状态并能够进行数据分析判断。该控制系统基于 FPGA 和高速固态继电器, 采用 PXI 平台以及上下位机模式, 控制精度为 0.1 ms, 能够满足试验需要。

## 参考文献:

- [1] 郭霄峰. 液体火箭发动机试验[M]. 北京: 中国宇航出版社, 1990.
- [2] 谢龙, 李海涛, 沈赤兵. 火箭发动机试验通用自动测试系统研究[J]. 计算机测量与控制, 2007, 15(4): 491-495.
- [3] 马爱华. 发动机试验数据自动采集处理系统研究与开发[J]. 计算机测量与控制, 2007, 15(7): 978-980.
- [4] 张志红. 可编程控制器(PLC)在发动机冷调试验中的应用[J]. 火箭推进, 2007, 33(1): 59-61.
- [5] 班超. FPGA 高精度时间测量[D]. 北京: 北京邮电大学, 2013.
- [6] 张朗. 基于 FPGA 的高精度测时仪研制[D]. 南京: 南京理工大学, 2012.
- [7] 戴彦, 申彦春, 王金红. FPGA 在小卫星姿态控制系统中的应用[J]. 光电与控制, 2009, 16(7): 76-79.
- [8] 李锦清, 刘文定, 赵鹏. FPGA 在卫星 AOCS 测试中的应用[J]. 测控技术, 2013, 32(12): 41-44.
- [9] 钱金川, 金林升. 固态继电器简介[J]. 机床电器, 2004, 31(4): 58-59.
- [10] 朱英明, 周长刚. 固态继电器(SSR)原理及应用中一些问题的探讨[J]. 机床电器, 2006, 33(1): 9-10.
- [11] 王昌华. 固态继电器及其应用[J]. 西北电力技术, 2004, 32(5): 9-52.
- [12] 邹进和, 李守明. 新型大电流直流固态继电器的设计[J]. 沈阳师范大学学报: 自然科学版, 2004, 22(4): 268-270.

(编辑: 陈红霞)