

doi: 10.7690/bgzdh.2020.09.006

## 火箭橇试验地面点火控制系统

朱轶龙, 孙浩, 白蕾, 王艳艳, 吕倩  
(中国兵器工业试验测试研究院, 陕西 华阴 714200)

**摘要:** 在发动机寄留释放火箭橇试验中, 需同时验证被试发动机静态、动态 2 种工作状态。为精确控制被试发动机及其他火工品, 使其能按预设时间依次工作, 设计地面多路时序点火控制系统。详细介绍硬件设计, 在此基础上给出主控芯片内部的工作流程及设计方法, 并进行试验验证。结果表明: 该系统攻克了高精度时序控制、多路大电流驱动输出、多路输出信号间串扰和环境适应性等关键技术, 能实现对弹上多种指令和多级火工品的点火控制。

**关键词:** 火箭橇; 高精度; 地面点火控制; CPLD

**中图分类号:** TJ450.2 **文献标志码:** A

## Rocket Sled Test Ground Ignition Control System

Zhu Yilong, Sun Hao, Bai Lei, Wang Yanyan, LYU Qian  
(Test & Measuring Academy of China Ordnance Industries, Huayin 714200, China)

**Abstract:** During the test of the engine-retained release rocket sled, it is necessary to simultaneously verify 2 working states of the tested engine statically and dynamically. Focusing on how to accurately control the engine and other initiating devices to operate in order according to the pre-set time, this paper designs a ground multichannel timing ignition control system. The hardware design is introduced in detail. Based on this, the internal work flow and design method of the main control chip are given, and the test is verified. The results show that the system breaks through the key technologies of high precision timing control, multi-channel large current drive output, multi-channel output signal crosstalk, and environmental adaptability, etc. This design can achieve ignition control of multiple commands and multi-stage pyrotechnics on the missile.

**Keywords:** rocket sled; high precision; ground ignition control; CPLD

### 0 引言

火箭橇是在专用的轨道上, 利用火箭发动机作动力推动火箭橇体高速前进, 以获取试验测试数据的大型地面动态试验系统<sup>[1]</sup>。火箭橇试验现有的地面点火控制方式是发射前将发动机正负极分别与点火电源正负极接通, 一次性同步点燃一枚或多枚火箭发动机。该方法控制简单, 中间环节少, 可能引起点火失败的因素少, 点火可靠性高。由于控制方法单一, 无法进行发射前弹上多种指令和多级火工品点火控制, 不能满足新型试验的控制要求<sup>[2]</sup>。

在发动机寄留释放火箭橇试验中, 为验证被试品发动机在静态、动态 2 种工作状态下的相关参数, 需要先点燃被试品发动机, 用爆炸螺栓将其固定在发射点, 静态工作一定时间后再起爆爆炸螺栓及推力发动机, 最终释放被试品发动机在火箭橇轨道运行, 验证其动态工作状态的相关参数<sup>[3]</sup>。

针对以上试验需求, 需设计专用的地面时序点火控制系统, 可输出多路点火信号, 可以进行发射前弹上多种指令和多级火工品点火控制, 输出电流

需满足起爆被试品发动机、爆炸螺栓、推力发动机等负载的要求, 且各路信号时序可实现精确控制等功能, 以满足试验需求<sup>[4]</sup>。

### 1 硬件设计

#### 1.1 系统主要技术指标

火箭橇试验地面多路时序点火控制系统主要技术指标如下:

- 1) 信号输出通道: 大于 16 路;
- 2) 控制时序: 可根据试验需求灵活设置, 时序间隔大于 1 ms;
- 3) 时间控制精度: 优于 0.1 ms;
- 4) 单路点火电流输出能力: 20~40 A。

#### 1.2 系统硬件设计原理及组成

地面多路时序点火控制系统硬件设计需要着重考虑选择合适的主控芯片、高精度时间基准以及大功率驱动器件, 以实现大电流点火信号的精确控制<sup>[5]</sup>。

系统的硬件电路采用复杂可编程逻辑器件

收稿日期: 2020-05-16; 修回日期: 2020-06-28

作者简介: 朱轶龙(1988—), 男, 陕西人, 硕士, 工程师, 从事武器动态参数测试研究。E-mail: zhuyilong215@163.com。

(complex programmable logic device, CPLD) 作为主控芯片<sup>[6]</sup>, 完成信号识别、时钟分频、计数器工作、控制信号输出、控制面板信号输出等功能。同时为了确保提供高精度的时序控制, 装置内部采用高精度恒温晶振作为内部时钟源。大电流驱动电路主要由驱动芯片及固态继电器组成, 接收控制信号最终控制点火电源, 输出大电流点火信号<sup>[7]</sup>。

地面多路时序点火控制系统可分为核心控制电路和驱动输出电路 2 部分进行设计。系统原理如图 1 所示。

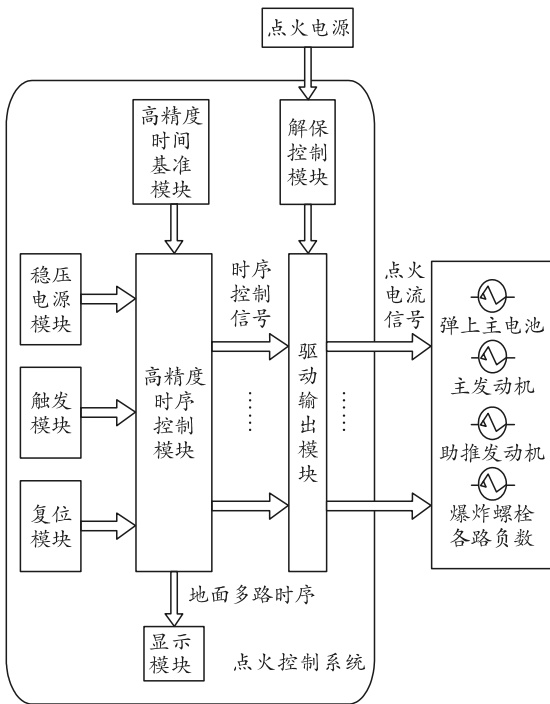


图 1 地面多路时序点火控制系统原理

核心控制电路用来进行时序控制, 产生高精度的时序控制信号, 硬件部分主要由稳压电源、触发、复位、显示、高精度时间基准和高精度时序控制等模块组成。驱动输出电路接收到控制时序信号后, 输出各个控制信号, 由时序信号控制继电器导通点火电池, 产生点火电流激活弹上主电池、伺服机构工作电池, 点燃主发动机、助推发动机和爆炸螺栓, 硬件部分由驱动输出模块、解保控制模块和点火电源组成。

### 1.3 核心控制电路设计

在核心控制电路设计过程中, 主要围绕高精度时间基准模块、高精度时序控制模块等展开。

高精度时间基准模块是地面多路时序点火控制

系统的时间基准, 系统采用 TCXO-HTC 型贴片温补晶体振荡器为高精度时序控制模块提供精确稳定的时基信号, 晶振频率为 10 MHz, 精度为  $1 \times 10^{-6}$ , 满足时序点火精度要求。

高精度时序控制模块是地面多路时序点火控制系统的核心部分, 利用 CPLD 高精度定时及控制技术, 主要用于识别触发信号开始计时, 产生符合时序要求的控制信号以控制驱动输出模块, 控制信号时间精度可达微秒级, 且时序控制程序可灵活设置, 根据试验需求不同, 可输出 16 通道的高精度时序控制信号, 控制驱动输出模块的开关状态。同时 CPLD 还可控制显示模块实时显示时序时间及各路点火信号的输出状态<sup>[8]</sup>。

地面多路时序点火控制系统核心控制电路如图 2 所示。

### 1.4 驱动输出电路设计

驱动输出电路设计主要包括驱动输出及解保控制 2 方面。

驱动输出模块根据接收到的多路高精度时序控制信号, 控制点火电源与本装置信号各输出通道的断开与闭合, 可将驱动输出模块等效为有输入控制端的开关, 输出常态为断开状态, 当其控制端接收到高电平信号时, 输出为闭合状态。以此方法可实现利用直流低电压信号(即高精度时序控制信号), 以控制隔离输出多路高电压、大电流的需求, 形成了控制多路大负载电流输出的能力, 单路输出驱动电路不小于 20 A。地面多路时序点火控制系统驱动输出电路如图 3 所示。

驱动输出模块以多组光电隔离型固态继电器为核心, 由于 CPLD 输出的控制信号驱动能力不足, 无法直接控制固态继电器; 因此, 还需利用高速大电流外设驱动芯片 SN75452, 提高 CPLD 输出的各路控制信号的驱动能力。对驱动输出模块进行了冗余设计, 用 2 路高精度时序控制信号控制一个固态继电器, 且 2 个固态继电器并行输出一路驱动输出信号, 相互备份提高驱动输出信号的可靠性<sup>[9]</sup>。

解保控制模块主要由解保控制开关和输出信号短路保护插头组成。解保控制开关主要用于控制点火电源与驱动输出模块输出端的连接, 输出信号短路保护插头主要用于对接入地面时序控制装置的火工品信号进行短路保护, 确保其安全性。

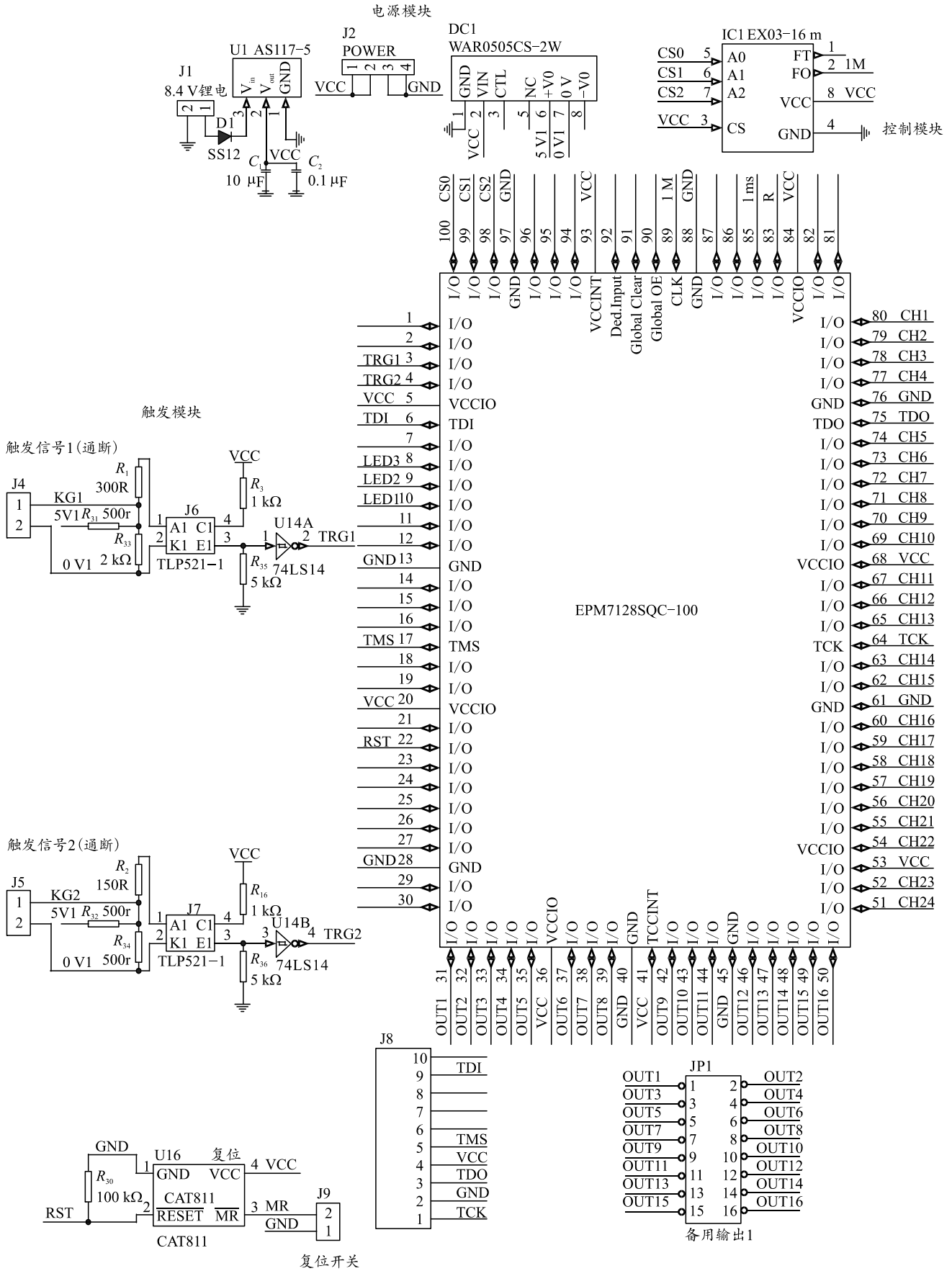


图 2 地面多路时序点火控制系统核心控制电路

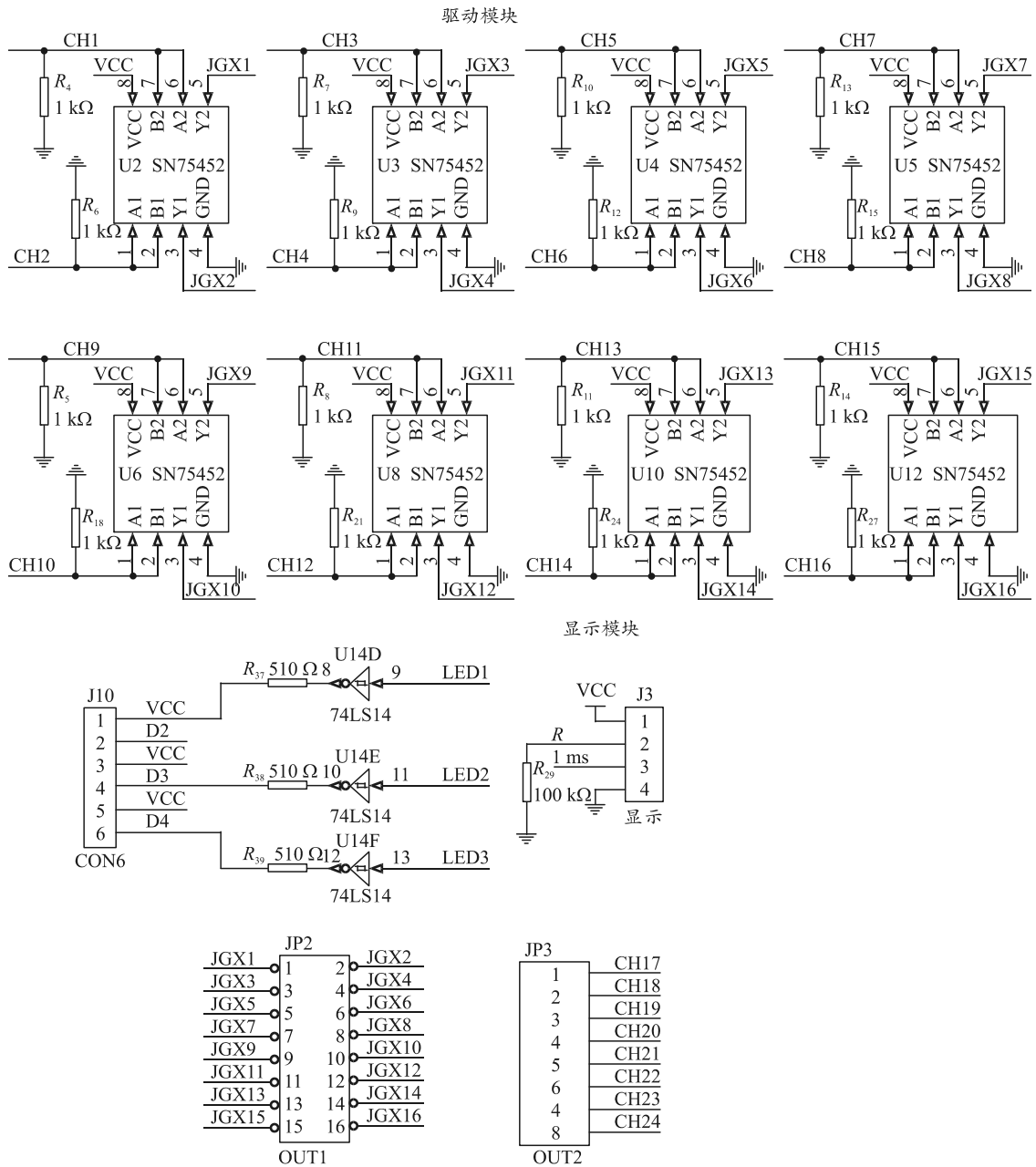


图 3 地面多路时序点火控制系统驱动输出电路

## 2 逻辑设计

逻辑设计是在硬件设计的基础上，着重设计主控芯片内部的工作流程及设计方法，以实现各模块间的逻辑控制功能，确保精确的时序控制功能。

高精度时序控制模块借助集成开发软件平台，利用超高速集成电路硬件描述语言 (very-high-speed integrated circuit hardware description language, VHDL) 语言和软件自带元件库对内部 CPLD 芯片各模块结构、功能、接口进行描述，时序设计主要由触发控制、显示控制和时序控制等模块组成。工作时，触发控制模块用于识别外部触发模

块所提供的由低电平到高电平的上升沿信号是否到来，若触发控制模块接收到此上升沿信号后，经 D 触发器保持高电平状态，以去除多次触发的干扰信号，同时使能显示控制模块和时序控制模块。显示控制模块用于向外部显示模块电路提供显示起始信号、实时显示数值信号和显示停止信号。时序控制模块是逻辑控制的核心部分，本模块用于输出各路时序控制信号<sup>[10]</sup>，当接收到触发控制模块的高电平信号后开始计时，根据所需求弹道时序设计内部计时逻辑，依次输出各路脉宽固定的时序控制信号。

逻辑设计流程如图 4 所示。

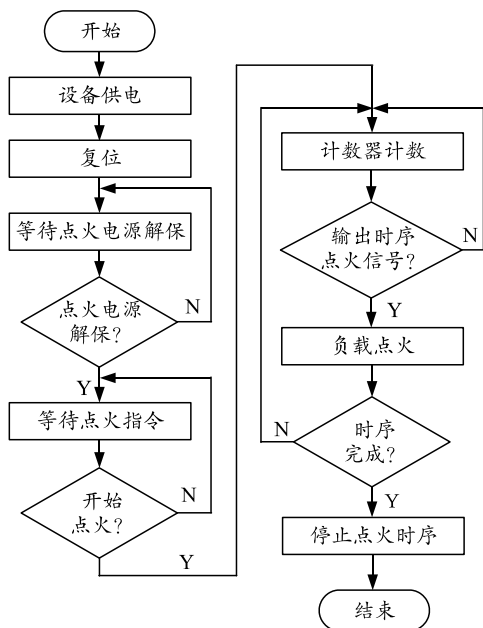


图 4 总体设计流程

CPLD 芯片内部时序逻辑工作流程：系统上电后，CPLD 芯片内部各模块复位。点火电源解保后，等待点火指令，并判断计数延时是否达到试验前预设的点火输出时间，若延时时间未到则继续判断，反之则输出相应的时序点火信号，负载点火。再次判断时序是否完成，若还有其他预设的时序点火信号，则计数器继续计时判断，循环上述指令，直至所有点火时序完成，点火时序停止，整个时序点火流程完毕。

### 3 可靠性设计

可靠性设计主要针对系统的使用对象为火工品，需做好抗干扰设计及备份冗余设计，确保对各类火工品进行可靠的控制，主要从以下方面进行设计：

1) 每路控制信号相互隔离，独立工作，同时继电器通过不同的开关模块和隔离触发模块完成了对大电流信号(各点火信号)和小电流信号的分类控制，消除干扰。

2) 进行可靠性设计。通过使用 CAT811 复位芯片设计复位电路，以及利用光耦隔离芯片提高触发电路的抗干扰能力，实现复位电路、触发电路和内部控制电路之间的隔离设计；另外增加备份输出电路，确保各路点火信号的可靠输出；同时选用屏蔽线作为点火控制信号线，避免外部复杂环境引起的信号串扰。

3) 设置解保开关。地面多路时序点火控制系统工作时，若某个点火回路发生意外故障时，可以立刻关闭解保开关，断开地面点火电池，终止点火程

执行。

4) 对地面多路时序点火主控制系统在实验室环境下进行功能性检测<sup>[11]</sup>，确保质量可靠、系统工作正常并经确认后方可用于试验。

## 4 验证与应用

### 4.1 实验室验证

1) 检测方法。

① 延时时间控制精度检测。

将系统的各路输出信号连接至数据采集系统，通过数据采集系统记录各输出信号脉宽及时刻值，需检测系统各路输出信号时序是否与预设时序及脉宽一致，满足技术指标要求，误差不超过 0.1 ms。

直到满足时序要求即可。

② 点火能力检测。

由于火箭橇试验中爆炸螺栓的可靠点火电流为 10~20 A，因此，需检测系统各路输出信号点火能力(电流能力)是否满足技术指标要求，即单路点火电流不小于 20 A。

将系统的 16 路点火输出信号连接各模拟点火负载的点火头，并用霍尔电流传感器及数据采集系统采集各点火回路电流值，进行点火能力检测。检测过程中点火电源电压为 12.7 V，每通道模拟点火负载与点火线路的总阻值控制在 0.6 Ω，点火瞬间理论电流值为 21.2 A。

2) 检测结果。

点火控制指令发出后，点火头能按正确时序可靠引爆，各点火输出信号电流值满足要求，数据采集系统采集的各启动触发信号波形正常。检测结果见表 1。

表 1 实验室检测结果

通道号	预置时间 $T_0/s$	数据采集系统记录时间 $T_1/s$	差值 $T_1-T_0/ms$	点火电流/A
1	0	0	0	20.9
2	0	0	0	20.5
3	0.001	0.001	0	21.5
4	0.001	0.001	0	21.3
5	0.01	0.01	0	20.2
6	0.01	0.01	0	20.1
7	0.1	0.1	0	21.1
8	0.1	0.1	0	21.3
9	1	1	0	21.1
10	1	1	0	20.3
11	10	10.000 01	0.01	20.8
12	10	10.000 01	0.01	20.7
13	20	20.000 02	0.02	20.1
14	20	20.000 02	0.02	20.1
15	60	60.000 05	0.05	20.6
16	60	60.000 05	0.05	21.5

地面多路时序点火主控制系统通过上述方法进行验证，结果表明：① 状态指示及功能正常；② 延

时时间精度满足设计要求；③ 点火能力满足设计要求。

#### 4.2 试验应用

以某试验时序点火要求为例，根据试验要求，地面多路时序点火主控制系统点火时序及信号输出设计如下：

1) -45 s: 弹上主电池激活信号 1 路为 2~4 A 电流，脉宽大于等于 200 ms；

2) -30 s: 弹上计算机启动信号 1 路为高电平信号，负脉冲有效，脉宽阈值大于等于 200 ms，驱动电流 8~10 mA；

3) -15 s: 伺服机构电池激活信号 1 路为 12~16 A 电流，脉宽大于等于 200 ms；

4) 0 s: 主发动机点火信号 1 路为 10~20 A 电流，脉宽大于等于 200 ms；

5) 15 s: 助推发动机点火信号 1 路为 5~10 A 电流，脉宽大于等于 200 ms；

6) 15 s: 助推发动机点火信号 1 路为 5~10 A 电流，脉宽大于等于 200 ms；

7) 15 s: 爆炸螺栓点爆信号 1 路为 20~40 A 电流，脉宽大于等于 200 ms。

火箭橇试验地面多路时序点火控制系统完成了弹上多种指令和多级火工品的点火控制，同时对爆炸螺栓、推力发动机等负载进行了精确的时序控制，时序控制精度及点火能力均满足设计要求，圆满完成了相关试验的时序控制要求。

#### 5 结论

笔者采用 CPLD 芯片作为主控芯片，设计了地面多路时序点火主控制系统，突破了高精度时序控制、多路大电流驱动输出、多路输出信号间串扰、环境适应性等关键技术，通过硬件设计、逻辑设计

及可靠性设计 3 部分内容，阐述了该系统的设计思路及实现过程。再通过实验室检测，验证了该系统满足相关技术指标要求，达到了设计目的，能够可靠进行时序点火控制。

在发动机寄留释放火箭橇试验中的实际应用结果证明：该系统不但可以对被试发动机弹上多种指令和多级火工品进行精确的时序点火控制，而且可以对爆炸螺栓、推力发动机等火工品进行精确的时序点火控制，达到被试发动机在静态、动态 2 种状态下工作的目的。

#### 参考文献：

- [1] 段宇鹏. 惯性测量装置火箭橇试验功能验证方法[J]. 导弹与航天运载技术, 2012(6): 34-37.
- [2] 陈东升, 魏宗康. 惯性测量装置火箭橇试验模拟导弹飞行加载方法[J]. 导弹与航天运载技术, 2009(2): 8-11.
- [3] 史慧芳, 李广伟, 雷林, 等. 固体发动机药剂倒空技术[J]. 兵工自动化, 2019, 38(8): 1-3.
- [4] 孙浩. 火箭橇多路时序点火控制系统设计[J]. 弹箭与制导学报, 2012, 32(4): 219-221.
- [5] 于丽娜. 某数据记录装置地面测试设备的设计与实现[D]. 太原: 中北大学, 2012: 50-52.
- [6] 王岩, 胡朝春, 黄革. 一种基于 CPLD 的交流电源信号发生器[J]. 兵工自动化, 2013, 32(2): 80-83.
- [7] 阎石. 数字电子技术基础[M]. 5 版. 北京: 高等教育出版社, 2006: 442-443.
- [8] 杜建海, 张丕状. 一种流水线存储的数据采集系统[J]. 兵工自动化, 2010, 29(9): 60-63.
- [9] 甄国涌, 郝晓鹏. 基于级联模式的多通道数据采集系统设计[J]. 计算机应用, 2011(2): 50-52.
- [10] 张友木. 基于 VHDL 语言的几种消抖电路的设计[J]. 山西电子技术, 2011(1): 61-63.
- [11] 李玉洁, 吴延军. 武器装备的测试性设计方法研究[J]. 舰船电子工程, 2017, 37(11): 126-129.