

# 固体火箭发动机电容充电式点火控制系统设计

王晓晖<sup>1</sup>, 陈 纲<sup>2</sup>

(1. 中国航天科技集团公司 第四研究院第四十一研究所 燃烧、流动和热结构国家级重点实验室, 西安 710025;

2. 陕西电器研究所, 西安 710025)

**摘要:** 点火控制系统是某型发动机地面系统的重要组成部分, 主要用于完成发动机的常态安全保护和点火控制任务; 为优化系统性能, 对电容充电原理和充电电路参数计算方法进行了研究, 设计了电容充电式点火控制系统, 解决了传统发动机点火电路应用大容量电池或电源模块来实现点火控制所带来的设备体积庞大、质量沉重, 不便应用于便携式地面系统的问题, 不仅可利用电容的瞬间放电能力准确实现对发动机的点火控制, 还大大减少了点火电路的质量和体积, 有效提高了系统的机动能力, 大大扩展了系统的应用范围。

**关键词:** 发动机; 电容; 充电; 点火

## Design of Capacitor Charging Ignition Control System for Solid Rocket Motor

Wang Xiaohui<sup>1</sup>, Chen Gang<sup>2</sup>

(1. 41st Institute, Academy of China Aerospace Science and Technology Corporation, State Key Laboratory of Combustion, Flow and Thermo-structure, Xi'an 710025, China;

2. Shanxi Electrical Equipment Institute, Xi'an 710025, China)

**Abstract:** Ignition control system is an important part of the ground system of a certain type of engine, which is mainly used to complete the normal safety protection and ignition control tasks of the engine. In order to optimize the performance of the system, the principle of capacitor charging and charging circuit parameter calculation methods are studied, the capacitance charging type ignition control system were designed and solved the traditional engine ignition circuit application of large capacity batteries or power supply module to realize the ignition control equipment brought by the large volume, heavy quality, inconvenience to be applied to portable ground system problem, not only can use capacitance instantaneous discharge ability accurate realization of engine ignition control, also greatly reduced the quality of the ignition circuit and volume, effectively improve the mobility of the system, greatly extend the application range of the system.

**Keywords:** motor; capacity; charging; ignition.

## 0 引言

固体火箭推进剂的顺利点火是火箭发动机正常工作的关键因素, 有可能直接影响发动机的全程工作状态和系统飞行试验结果。对于一个性能良好的点火系统来讲, 必须保证在发动机的技术指标范围内, 可靠地点爆发动机火工品。基于固体发动机的点火特性, 实际应用时一般采用电起爆器作为发动机的发火元件, 由一定功率的激励源完成电起爆器的激活, 通过其内部的具有一定阻值的桥丝, 实现从电能到热能的转换, 加热桥丝周围的点火药包并起爆主装药。

发动机是构成火箭的总体质量和结构外形的主体部分, 其特性决定了需要提供较大的点火电流和瞬间功率, 才能实现发动机的正常点火。以往的点火系统在实现发动机点火控制时, 大都是采用具有较大输出参数的电源模块或供

电电池, 利用其放电实现发动机的点火控制。由于大容量的供电电池或电源模块不仅体积庞大而且质量沉重, 故整个点火控制系统的外形和重量均不利于外场携行和设备展开, 也不便应用于对安装空间有要求的载体。如果能够应用体积小、质量轻的小容量电源模块或电池给电容充电, 存储完成发动机点火所需的能量, 利用电容瞬间放电实现对电起爆器的激活, 就可以降低电源模块的参数, 大大减小点火控制系统整套设备的质量和体积。

综上所述, 本文对电容充电式点火控制系统进行了整体设计, 以假定电起爆器的点火电流为大电流 5~10 A, 且大于 5 A 的持续时间需要大于 50 ms 进行论述, 给出了充放电电路的参数计算方法, 设计了充/放电控制电路、激励转换电路及火工品安全保护电路等, 探讨了电容充放电电路的状态特性, 为进一步研究充电式点火提供了一种测控手段。

## 1 电容充电式点火控制系统组成及原理

### 1.1 系统组成

电容充电式点火控制系统由交流电源、直流电池、点

收稿日期: 2019-06-19; 修回日期: 2019-07-05。

作者简介: 王晓晖(1978-), 女, 甘肃嘉峪关人, 硕士, 高级工程师, 副主任设计师, 主要从事火控总体方向的研究。

火控制器和相关电缆组成。其中点火控制器为整个系统的核心设备,由电源单元、检测单元和发射控制单元三部分组成。考虑为了便于外场野外环境使用,点火控制器的供电输入方式设计为交、直流两种形式,依据不同的控制信号,可将处理后的交流信号或直流电池激励接入电容充电电路,配合控制电路完成发动机火工品点火。具体系统组成结构框图如图 1 所示。

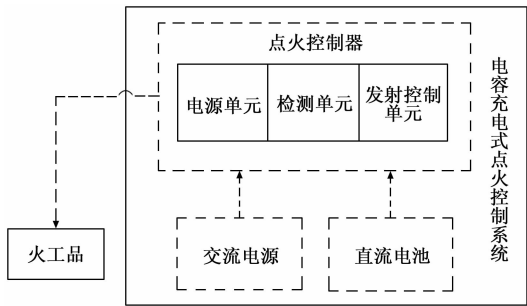


图 1 电容充电式点火控制系统组成结构框图

### 1.2 工作原理

电容充电式点火控制系统电气原理图如下图 2 所示,点火控制器面板布局示意图如下图 3 所示,下面结合图 2~3 对系统工作原理进行说明。

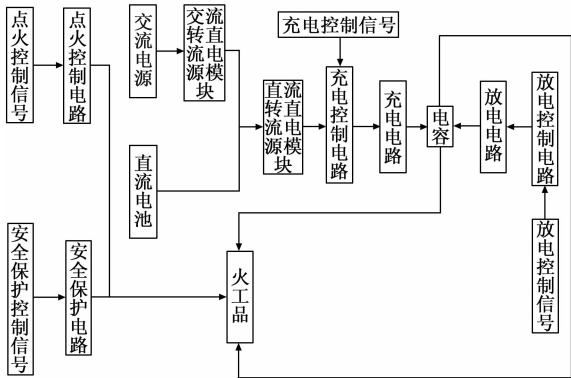


图 2 电容充电式点火控制系统电气原理图

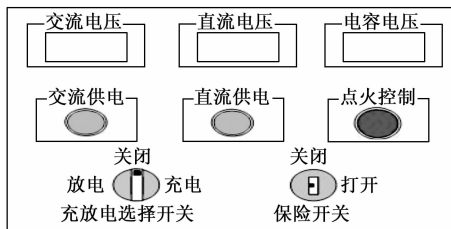


图 3 点火控制器面板布局示意图

在常态时,由点火控制器内部的安全保护电路完成对发动机火工品的保护。当需要对发动机火工品进行点火控制时,按照现场环境选择合适的输入激励(内场或者有 220 V 的外场环境选择交流电源作为输入激励,没有 220 V 的外场环境选择直流电池作为输入激励),接入内部的直流电源升压转换电路(按下“交流供电”开关后,即将交流电

源接入点火控制器。首先需经过一组 AC-DC 电源模块,完成输入交流信号的直流变换,然后再接入直流电源升压转换电路;按下“直流供电”开关后,即将点火控制器内部装载的电池的输出生信号直接接入直流电源升压转换电路)。直流电压信号经过升压转换电路调理后,作为充电电压,可待接入电容充电电路。

当需要进行火工品点火时,将电容充放电选择开关拨至“充电”档,接通电容充电电路,即可对电容进行充电,同时应用数字表头对电容两端的电压进行实时监控。待在点火控制器的表头上观测到电容两端电压满足要求后,将充放电选择开关拨至“关闭”档(空档),断开电容充电电路,然后将保险开关拨至“打开”档,去除火工品的安全保险,按下“点火控制”开关,接通火工品的点火控制通路,即可实现发动机的点火控制。当因外因需要取消发射时,将充放电选择开关拨至“放电”档,接通电容放电电路,即可对电容进行放电,待在点火控制器的表头上观测到电容两端电压为零后,将充放电选择开关拨至“关闭”档(空档),断开电容放电电路,然后将保险开关拨至“关闭”档,接通火工品的安全保险,为发动机火工品提供安全保护回路,即可恢复常态。

## 2 点火控制器设计与实现

点火控制器由电源单元、检测单元和发射控制单元三部分组成,检测单元包含多组开关状态指示灯及数字电压监控表头,用于完成对给点火控制器供电的 220 V 交流电压、给点火控制器供电的 24 V 直流电池电压、电容充电/放电电压及点火控制状态的实时监控,工作原理较为简单,故着重对电源单元和发射控制单元进行介绍。

### 2.1 电源单元设计

考虑为满足外场无交流供电条件下使用的环境要求,点火控制器采用交流、直流两种供电输入形式,故电源单元包含 3 部分电路,分别为交流电源供电电路、直流电池供电电路和激励转换电路。

#### 2.1.1 电源模块电压的选择

根据国家标准,电源模块的直流电压应是 5 V、12 V、24 V、28 V、48 V、96 V 等标准电压。由于电容放电点火电流呈指数衰减,要满足上述要求,必须提高点火电流的初始值。因此,按照点火电流初始值为 9~12 A 进行点火电压选择。

如果点火电压选择 48 V,则整个点火回路阻值应在 4.0~5.3 Ω。扣除点火电缆的线路阻值和火工品的阻值,点火电路的限流电阻应为 1~1.7 Ω,查常用元器件手册可知,大功率电阻阻值为 1 Ω、2 Ω 档,因此限流电阻可选择为 1 Ω。如果点火电压选择 96 V,则整个点火回路阻值应在 8.0~10.7 Ω,限流电阻应为 5~7.1 Ω,查常用元器件手册可知,大功率电阻阻值为 5 Ω、6.8 Ω、10 Ω 档,因此限流电阻可选 5 Ω、6.8 Ω。

选择 48 V 作为点火电压的优点是:电压较低,性价比

好; 缺点是: 限流电阻只能选择  $1\ \Omega$ , 此数值恰好落在选择阻值范围的下限, 由于火工品点火电流规定有上、下限范围, 如果点火回路的阻值有一个  $0.1\ \Omega$  的变化范围, 则点火电流就无法满足要求。选择  $96\ \text{V}$  作为点火电压的优点是: 限流电阻可以选  $6.8\ \Omega$ , 此数值落在阻值选择范围的中间, 线路阻值的轻微变化不易导致点火电流超出范围。综合考虑点火功率等因素, 故选择  $96 \pm 3\ \text{V}$  电压作为点火电压, 便于选择常用规格的电源模块和电路元器件。

### 2.1.2 直流电池电压的选择

点火控制器可以选择直流电池作为直流输入, 兼顾考虑交流输入时, 完成交直流变换的 DC-DC 电源模块的输入参数, 可以选择  $24\ \text{V}$  或  $12\ \text{V}$  电压的激励。由于  $12\ \text{V}$  蓄电池为  $4\ \text{Ah}$  容量, 不足以提供点火所需能量, 故选择两块  $12\ \text{V}$  电池串联后给点火控制器进行供电。

### 2.1.3 电源电路

根据外接直流供电激励选择  $24\ \text{V}$  电池, 电容充电选择  $96\ \text{V}$  电压的要求, 点火控制器中的交流供电方式采用一个 AC-DC ( $24\ \text{V}$ ) 电源模块和一个 DC-DC ( $24 \sim 96\ \text{V}$ ) 电源模块进行功能实现; 直流供电方式则将电池直接接到 DC-DC ( $24 \sim 96\ \text{V}$ ) 电源模块上, 将  $24\ \text{V}$  电压转换为  $96\ \text{V}$  电压进行充电、点火。具体电路原理如图 4 所示。

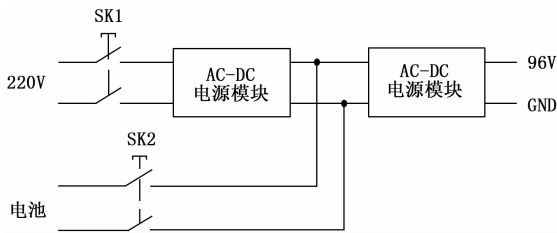


图 4 电源电路原理示意图

#### 1) 交流电源供电电路:

点火控制器外接交流电源为  $220\ \text{V}$ 、 $50\ \text{Hz}$  交流电, 在点火控制器面板上设置交流供电控制开关 (SK1), 用于控制点火控制器的交流电源的输入或断开。

#### 2) 直流电池供电电路:

直流电源仅在无交流供电的情况下使用, 用两个  $12\ \text{V}$  电池串联后作为直流电源, 在点火控制器面板上设置有直流供电控制开关 (SK2), 用于控制点火控制器的内部电池的输入或断开。

#### 3) 激励转换电路:

点火控制器中用一个 DC-DC 电源模块将  $24\ \text{V}$  直流信号转换为  $5\ \text{V}$ , 用于为数字电压监控表头和指示灯供电; 用一个 AC-DC 电源模块将  $220\ \text{V}$  交流信号转换为  $24\ \text{V}$ , 用于后级电压调理; 用一个 DC-DC 电源模块将  $24\ \text{V}$  直流信号转换为  $96\ \text{V}$ , 用于为电容进行充电, 实施火工品的点火。

## 2.2 发射控制单元设计

发射控制单元包含三部分电路, 分别为电容充放电控

制电路、安全保护电路和点火控制电路。安全保护电路主要用于在常态时为火工品提供一种保护手段, 对静电等干扰进行有效释放, 在此不再赘述。具体电路原理如图 5 所示。

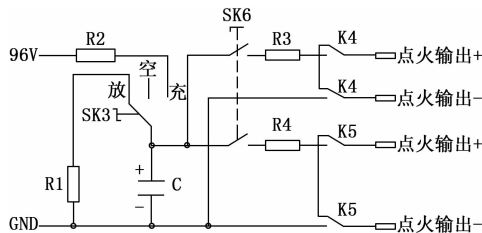


图 5 发射控制电路原理示意图

### 2.2.1 电容充放电控制电路

点火控制器面板上设置有一个单极三位选择开关 (SK3), 控制电容的充放电, 分别为“关闭”档、“充电”档、“放电”档。为防止充电瞬间电压超限, 对点火电路造成影响, 在电容两端并联瞬变电压抑制二极管, 对电路进行保护。

### 2.2.2 点火控制电路

假定火工品点火线路为两路独立的回路 (如火工品有多组点火回路时, 同理计算即可), 其点火电压由充电电容提供。点火控制器面板上分别设置有“点火保险”开关 (SK5)、“点火控制”开关 (SK6), 控制火工品的点火。由于点火时的初始电流较大, “点火保险”、“点火控制”功能均采用电磁继电器进行控制。

### 2.2.3 电容参数选择

#### 2.2.3.1 选取原则

在选取放电电容与回路电阻时, 需要考虑以下两个主要因素:

1) 为了保证较大的点火电流, 回路电阻应该减小, 但会造成放电时间常数  $\tau$  变小, 点火电流持续  $5\ \text{A}$  以上的时间也相应缩短;

2) 为了延长放电时间常数  $\tau$ , 需要增加回路电阻或电容容量。增大回路电阻会使点火电流减小, 增大电容容量会使元器件成本增高, 且体积增加。

综合以上分析, 需要对电容及电阻的取值进行平衡选择:

首先, 需要保证点火电流足够大。由于电容的放电电流呈指数衰减, 所以电流初始值应较大, 假定选择点火电流初始值为  $9 \sim 12\ \text{A}$ 。因为点火电压为  $96 \pm 3\ \text{V}$ , 所以回路电阻应在  $7.75 \sim 11.0\ \Omega$  范围内。其次, 需要计算在不同回路电阻时, 能够保证点火电流大于  $5\ \text{A}$  且持续时间大于  $50\ \text{ms}$  所需的电容容量。

#### 2.2.3.2 电容参数选择

由于点火电压为  $96 \pm 3\ \text{V}$ , 而电容电压有  $63\ \text{V}$ 、 $100\ \text{V}$  档, 因此选择电压为  $100\ \text{V}$  的电容。电容容量选取如下, 首先需计算单个点火回路所需的电容容量:

由常规原理，电容放电电压计算公式为：

$$U = U_0 \cdot e^{-\frac{t}{RC}}$$

由此可得，电容放电电流计算公式为：

$$I = \frac{U_0}{R} \cdot e^{-\frac{t}{RC}}$$

经转化后，得到电容容量的计算公式：

$$C = \frac{-t}{R \cdot \ln \frac{I \cdot R}{U_0}}$$

其中：R 为放电电阻阻值，在这里为单个点火回路的实测阻值 9.3~10.1 Ω。

为了满足单个回路点火电流大于 5 A，且持续时间大于 50 ms 的要求，电容容量 C 应为满足点火要求的最小取值。其中 t=50 ms，I=5 A，R=10.1 Ω，U<sub>0</sub>=93 V，计算结果为：

$$C = \frac{-t}{R \cdot \ln \frac{I \cdot R}{U_0}} = 8\ 108\ \mu F$$

表 1 是对应不同回路电阻 R 时，电容 C 的最小取值：

表 1 对应不同回路电阻 R 的电容计算结果

R(Ω)	6.0	7.0	8.0	9.0	10.0	11.0	12.0
C(×103μF)	7.4	7.3	7.4	7.7	8.1	8.7	9.5

由表中数据可以看出，回路电阻为 7.0 Ω 时所需电容容量最小。

### 2.2.3.3 理论计算曲线

图 6 是 U<sub>0</sub>=96 V，C=10 000 μF，R 分别为 6.0 Ω、7.0 Ω、8.0 Ω、9.0 Ω、10.0 Ω、11.0 Ω、12.0 Ω 时的点火电压理论曲线 (U<sub>0</sub>=96 V，C=10 000 μF)。图 7 是点火电流理论曲线 (U<sub>0</sub>=96 V，C=10 000 μF)。

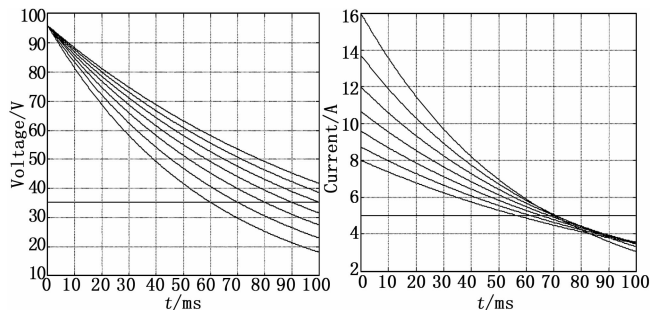


图 6 点火电压理论曲线 图 7 点火电流理论曲线

表 2 列出了点火电流降至 5 A (U<sub>0</sub>=96 V，C=10 000 μF) 所需的时间。

表 2 点火电流降至 5 A 所需时间

R(Ω)	7.0	8.0	9.0	10.0	11.0	12.0
时间(ms)	70.6	70.0	68.2	65.2	61.3	56.4

### 2.2.3.4 电容参数选择

综上计算，单个回路所需电容容量最小取值为 8 108

μF，那么两路回路所需电容容量最小取值则为 8 108×2=16 216 μF。根据表 3 的计算结果，并考虑余量，单个回路的点火电容不应小于 10 000 μF。查表可知，100 V 的电容容量有 10 000 μF、22 000 μF、47 000 μF 档，根据电容容量最小取值，并考虑预留一定容量，选择充电点火电容为 1 只容量 22 000 μF、耐压 100 V 的铝电解电容器，同时为两路点火回路提供能量。

### 2.2.4 充放电电阻选型

由于 96 V 电源模块选取了 0.5 A 的电流参数，因此电容最大充电电流必须小于 0.5 A。电容的充电电流计算公式如下：

$$I = \frac{U_0}{R} \cdot (1 - e^{-\frac{t}{RC}})$$

当电容充满时，e<sup>-t/RC</sup> 近似等于 0，此时充电电流最大，

$$I_{max} = \frac{U_0}{R}$$

电容充电时间常数计算公式为：τ=RC。表 3 列出了不同充电电阻档所对应的最大充电电流及充电时间常数。其中 U<sub>0</sub>=96 V，C=22 000 μF。

表 3 不同充电电阻档的最大充电电流及充电时间常数

电阻值/Ω	150	220	330	470	560
最大充电电流/A	0.64	0.44	0.29	0.20	0.17
充电时间常数/s	3.3	4.84	7.26	10.34	12.32

由表可知，220 Ω 电阻的最大充电电流余量较小，470 Ω 电阻的充电时间常数又太长，经比较考虑，选择 330 Ω 充电电阻较为合适。电容放电电阻选择与充电电阻相同规格型号的电阻，这样保证充放电时间常数一致，便于测试。

## 3 试验情况

系统研试完成后，经过多次模拟点火试验考核。在各项试验中，均可正常实现点火，且操作使用可靠。点火测试数据表明：单个点火回路电流大于 5A 且持续时间均大于 50 ms，满足设计要求。

### 3.1 电容充放电电路测试

将电容充放电选择开关 (SK1) 打至“充电”档，从数字电压表头监测点火电压，电压慢慢升至 96 V，满足要求。电容充电时间常数的计算如下 1) 条所示，充电曲线如下图 8 所示；将电容充放电选择开关 (SK1) 打至“放电”档，检查点火电压，电压从 96 V 慢慢下降至零，满足要求。电容放电时间常数的计算如下 2) 条所示，放电曲线如图 9 所示。

1) 根据电容充放电曲线计算电容充放电时间常数，具体计算如下：

电容充电电压 U<sub>充</sub> 计算公式：

$$U_{充} = U_0 (1 - e^{-\frac{t}{RC}})$$

充电电压 U<sub>0</sub>=96 V，当 t=τ=RC 时，U<sub>充</sub>=96×(1-

0.368) = 60.67 V

即电压从 0 V 升至 60.67 V 时, 充电时间即为一个充电时间常数  $\tau_{充}$ , 由充电曲线可知  $\tau = 8.2$  S, 满足 7.26S ± 15% 要求。

2) 根据电容充放电曲线计算电容充放电时间常数, 具体计算如下:

电容放电电压  $U_{放}$  计算公式:

$$U_{放} = U_0 \cdot e^{-\frac{t}{RC}}$$

放电电压  $U_0 = 96$  V, 当  $t = \tau = RC$  时,  $U_{放} = U_0 \cdot e = 96 \cdot 0.368 = 35.33$  V

即电压从 96 V 降至 35.33 V 时, 放电时间约为一个放电时间常数  $\tau_{放}$ , 由放电曲线可知  $\tau = 7.9$  S, 满足 7.26S ± 15% 要求。

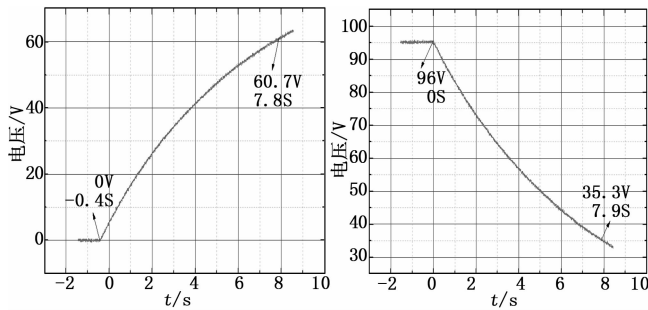


图 8 电容充电曲线

图 9 电容放电曲线

### 3.2 点火功能试验

将电容充放电选择开关 (SK1) 打至“充电”档, 检查点火电压, 电压慢慢升至 96 V, 满足要求。

两路点火电路的点火曲线如图 10~图 13 所示, 由点火曲线可以看出:

1) 第一路点火电路第一次点火最大电流为:

$$I = \frac{U}{R} = \frac{27.8}{3} = 9.27A$$

大于 5 A 的持续时间为: 75-0=75 (ms)

2) 第一路点火电路第二次点火最大电流为:

$$I = \frac{U}{R} = \frac{27}{3} = 9A$$

大于 5 A 的持续时间为: 67-3=64 (ms)

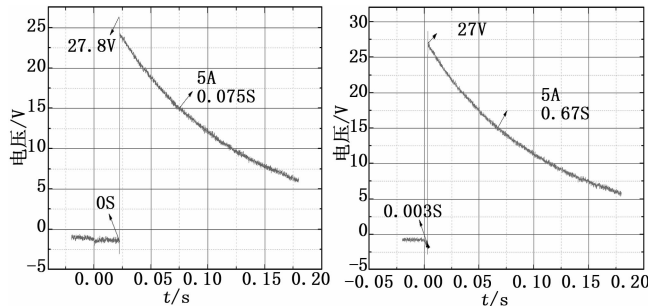


图 10 第一路第一次点火曲线

图 11 第一路第二次点火曲线

3) 第二路点火电路第一次点火最大电流为:

$$I = \frac{U}{R} = \frac{30}{3} = 10A$$

大于 5 A 的持续时间为: 80-0=80 (ms)

4) 第二路点火电路第二次点火最大电流为:

$$I = \frac{U}{R} = \frac{30.5}{3} = 10.17A$$

大于 5 A 的持续时间为: 70-0=70 (ms)

综上所述可得: 两路点火电路最大点火电流均介于 9~12 A, 且电流大于 5 A 的持续时间均大于 50 ms。

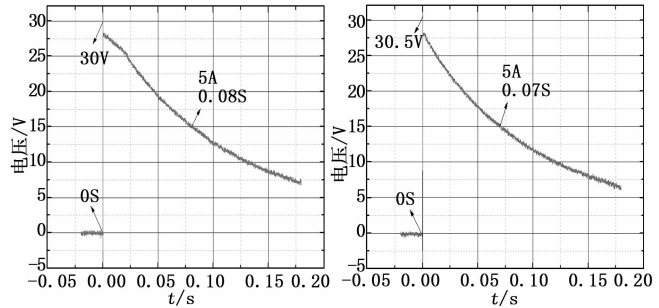


图 12 第二路第一次点火曲线

图 13 第二路第二次点火曲线

## 4 结束语

电容充电式点火电路的性能主要由充电电压和储能电容两项参数决定, 该电路采用电容储能放电的方式对火工品实施点火, 瞬间放电能力完全可以满足火工品对点火电流和点火功率的要求。以其为技术基础研制的电容充电式点火控制系统能够保证发动机火工品在试验、使用时的安全性; 同时, 轻巧便携、控制精度高、展开迅速等优点使其在未来的发射控制技术领域中有着广阔的应用前景, 有效提高了点火系统的工作效率, 将使固体火箭发动机的点火控制技术上一个新的台阶。

### 参考文献:

- [1] 陆廷孝, 郑鹏洲. 可靠性设计与分析 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2011.
- [2] Natamian R. 电力电容器 [M]. 徐政译. 北京: 机械工业出版社, 2007.
- [3] 蔡瑞娇. 火工品设计原理 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1999.
- [4] 张烈刚, 郭勇. 基于 VXI 总线的飞机军械设备自动测试系统 [J]. 计算机测量与控制, 2002, 10 (5): 324-326.
- [5] 田宇. 某型导弹发控信号检测系统的设计与实现 [J]. 计算机测量与控制, 2013, 21 (2): 406-408.
- [6] 刘明芳, 张小兵. 半导体桥点火电路的设计与仿真 [J]. 火工品, 2008, 2: 1-5.
- [7] 邹开凤, 李勋章, 殷合香. 电容放电点火装置参数的选择研究 [J]. 汽车工程, 2007, 29 (5) 401-403.
- [8] 智强. 电容充放电中一个不容忽视的电阻 [J]. 郑州铁路职业技术学院学报, 2004, 16 (2): 47-48.
- [9] 刘永庄, 刘杰, 赵宜, 等. 电容放电连续多次点火装置的研究 [J]. 汽车电器, 2004, 5: 14-15.
- [10] 刘庆明, 汪建平, 李磊, 等. 电火花放电能量及其损耗的计算 [J]. 高压电技术, 2014, 40 (4): 1255-1260.