

doi: 10.7690/bgzdh.2022.10.003

# 基于 Simulink 的点火电流计算方法

段亚博, 韩旭, 关莹, 谷静, 宋蔚阳, 王丰  
(北京航天长征飞行器研究所, 北京 100071)

**摘要:** 针对电火工品实际工程应用中如何保证其可靠作用的问题, 提出一种基于 Simulink 仿真软件的点火电流计算方法。分析电火工品点火原理, 综合考虑高温环境下点火电路电缆阻值变化、接插件接触电阻等影响因素, 通过仿真计算复杂点火电路点火电流, 并进行试验验证。结果表明: 该算法能提高火工品工作可靠性, 节省研制成本, 为工程设计领域提供一种可行的方法。

**关键词:** 电火工品; 点火电流; 可靠性

**中图分类号:** TJ450.2 **文献标志码:** A

## Calculation Method of Ignition Current Based on Simulink

Duan Yabo, Han Xu, Guan Ying, Gu Jing, Song Weiyang, Wang Feng  
(Beijing Institute of Space Long March Vehicle, Beijing 100071, China)

**Abstract:** Aiming at the problem of how to ensure the reliability of electric explosive device (EED) in practical engineering application, a calculation method of ignition current based on Simulink simulation software is proposed. The ignition principle of EED was analyzed, and the influence factors such as the resistance change of ignition circuit cable and the contact resistance of connectors in high temperature environment were comprehensively considered. The ignition current of complex ignition circuit was calculated by simulation and verified by experiments. The results show that the algorithm improves the reliability of initiating explosive device, saves the development cost, and provides a feasible method for the engineering design field.

**Keywords:** EED; ignition current; reliability

### 0 引言

火工品是装有火工药剂、受外界能量刺激后产生燃烧或爆炸, 用以引燃引爆做机械功的一种装置<sup>[1]</sup>。

在军事领域, 火工品已被广泛地应用于导弹和常规武器研制及生产中, 例如在导弹工作剖面中, 发射、级间分离、热电池激活、引信解保和战斗部起爆等环节均使用了大量的火工品<sup>[2-3]</sup>。在卫星工作过程中, 火工品主要用于卫星供热及遥感遥测。在民用领域, 火工品广泛应用于矿石开采和民用爆破等<sup>[4]</sup>。在工业领域, 火工品广泛应用于爆炸成型加工、切割金属等作业<sup>[5]</sup>。综上所述, 如何保证火工品可靠作用已成为军用和民用领域一个重要技术问题<sup>[6]</sup>。笔者提出一种基于 Simulink 仿真软件的点火电流计算方法, 可以精确计算复杂电路中火工品点火电流, 经过点火试验验证, 理论计算结果与试验数据基本一致。

### 1 电火工品点火原理

桥丝式电火工品是一种重要的火工品, 广泛应用于军用和民用领域<sup>[7]</sup>, 其发火过程是一个复杂且

不稳定的过程, 主要涉及的物理过程包括电热能转换、热传导和火工品药剂爆炸, 其点火的物理过程对实际应用具有重要意义。

桥丝式电火工品主要工作过程如下: 1) 由点火电路向电火工品注入恒定的点火电流, 电流电能转化为热能, 引起电桥发热; 2) 电桥将部分热量扩散至周围药剂, 此时药剂还未发生明显的化学反应; 3) 当火工品药剂热量达到化学反应的温度阈值时, 火工品最终发火作用。在这个过程中桥丝式电火工品的温升曲线如图 1 所示。

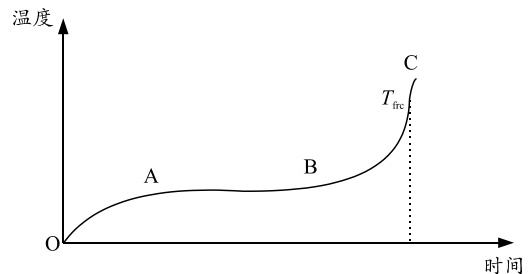


图 1 桥丝式电火工品发火温升曲线

从上图可知: OA 段为发火过程的初始阶段, 该阶段桥丝自身温度较低, 桥丝向周围火工品药剂

收稿日期: 2022-06-01; 修回日期: 2022-07-28

作者简介: 段亚博(1989—), 男, 河南人, 博士, 工程师, 从事引控系统设计与智能探测技术研究。E-mail: duanyabovip@126.com。

的散热效率低，火工品药剂无显著的化学反应，该阶段主要变化是输入的电能在桥丝上发热转变成热能，同时伴随着桥丝温度逐渐升高。随着时间推移，AB 段曲线中桥丝温度逐渐升高，此时桥丝向周围药剂的散热较为明显，但该阶段药剂的化学反应还不明显，桥丝的升温过程仍显得较为缓慢，该阶段主要变化是药剂升温和药剂的加热区逐渐扩大。BC 段是火工品发火的最后阶段，该阶段由于电能持续转化成的热能和药剂热分解反应产生的热能的累积效应，温度陡增，药剂温度最终达到了可以加速反应的阈值温度  $T_{fire}$ ，电火工品发火<sup>[8]</sup>。

假设发火过程中电火工品的工作电流为  $I$ ，输入电功率  $P(t)$ 为：

$$P(t)=I^2R\{1+a[T(t)-C]\}。 \quad (1)$$

式中： $P$  为功率，W； $I$  为电流，A； $R$  为桥丝在常温时的电阻， $\Omega$ ； $a$  为桥丝材料温度系数， $K^{-1}$ ； $T$  为桥丝温度，K； $C$  为环境温度，K。在桥丝加热的初始阶段，例如图 1 中的 OA 阶段，桥丝温度主要由注入的电流大小和持续时间决定，此时药剂基本没有发生化学反应，认为化学反应释放的热量可以忽略不计，因此根据能量守恒可知：

$$cm(dT/dt)=I^2R\{1+a[T(t)-C]\}。 \quad (2)$$

式中： $c$  为桥丝材料的比热容， $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ ； $m$  为桥丝质量，kg；桥丝温度  $T$  为时间  $t$  的函数。当桥丝温度  $T$  达到点火温度  $T_{fire}$  时桥丝点火。

在实际工程研制阶段，桥丝式电火工品多为制式产品，桥路电阻  $R$ 、点火电流  $I$  和点火脉宽参数已知，需要设计合适的点火电路来实现火工品可靠点火。下文介绍一种基于 Simulink 仿真软件的点火电流计算方法，为火工品点火电路设计提供依据。

## 2 仿真计算方法

Simulink 是一种常用的仿真计算软件，具有模型精细、易于操作和效率高等优点，已广泛应用于工业领域和学术领域中的复杂仿真计算<sup>[9-10]</sup>。

Simulink 发火电路仿真流程如图 2 所示。

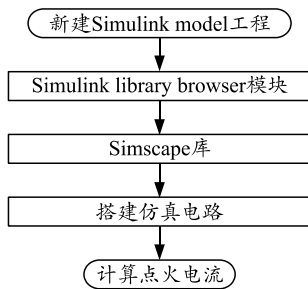


图 2 计算流程

具体操作如下：

- 1) 通过 Matlab 软件新建 Simulink model 工程；
- 2) 在 Simulink model 工程中打开 Simulink library browser 库文件浏览器；

3) 在 Simscape 中选择所用的电子元器件并连接成电路，选择电压、电流监视模块 (Current sensor 或者 Voltage sensor)，需要注意的是，Current sensor 需要连接 PS-simulink Converter 模块和 Scope 模块才能观测到输出信号波形。

4) 最后在电路中配置 Solver configuration 和 Electrical reference<sup>[8]</sup>，之后可进行电路仿真并分析计算数据。

具体仿真过程中考虑了电池内阻、线缆接插件接触电阻、线缆阻值，其中线缆阻值考虑了高温环境下的阻值变化。

桥丝火工品工作参数如下：

- 1) 电桥形式：单桥；
- 2) 点火器桥路电阻：0.9~1.2  $\Omega$ ；
- 3) 点火器绝缘电阻：各芯点对产品壳体的绝缘电阻在 250 V 电压下不小于 20 M $\Omega$ ；
- 4) 点火器供电电流：5~10 A，脉宽 100 ms。

经仿真计算，电路中可提供的点火电流为 5.369 A，如图 3 所示，满足桥丝火工品点火电流 5~10 A 的要求。

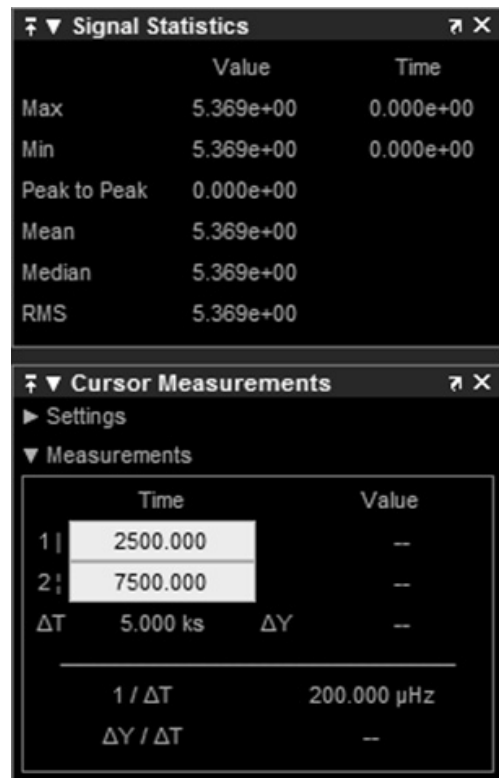


图 3 电路仿真结果

### 3 试验验证

为模拟真实工况同时验证仿真计算的准确性，开展了火工品点火试验，仿真电路中的稳压电源由火工品电池替代，电池电压 28 V，试验布置如图 4 所示。

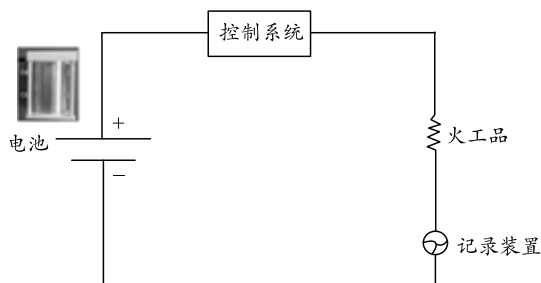


图 4 试验示意图

试验过程中采用数据记录装置记录其中一路火工品工作电流，如图 5 所示。数据记录装置采集数据为电压，与电流比例关系为  $1\text{ V}=0.1\text{ A}$ ，记录的火工品点火电流均值约 5.1 A，与计算值 5.369 A 相差 0.269 A，误差约 5%，可认为该仿真计算方法具有可行性。

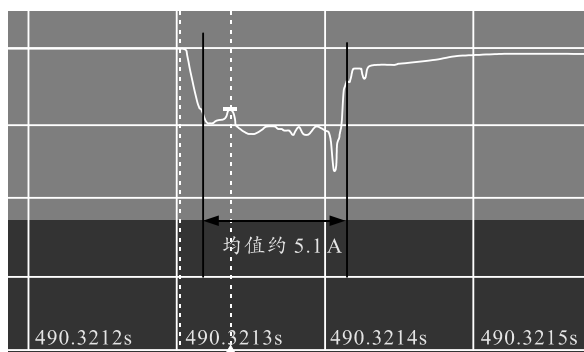


图 5 火工品点火电流实测结果

### 4 结论

笔者分析了电火工品的点火过程，介绍了基于 Simulink 仿真软件的点火电流计算方法，通过仿真计算了火工品点火电流，并在试验室开展了点火试验。仿真计算结果与试验数据误差约 5%，验证了该仿真计算方法具有可行性，为工程设计领域提供了一种提高火工品工作可靠性的仿真计算方法。

### 参考文献：

- [1] 李国新, 程国元, 焦清介. 火工品实验与测试技术[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1998: 9-10.
- [2] 丁平, 马晓明. 安全可靠的火工品点火电路设计[J]. 兵工自动化, 2015, 34(4): 28-29.
- [3] 赵曦, 王栋, 刘华文, 等. 某导弹火工品模拟训练系统方案[J]. 兵工自动化, 2012, 31(3): 94-96.
- [4] 尹波, 张奇锋, 李卫军, 等. 火工品电阻测量仪器的发展趋势[J]. 兵工自动化, 2009, 28(4): 88-90.
- [5] 赵金芳. 火工品多参数测试系统设计[D]. 太原: 中北大学, 2011.
- [6] 邵苗苗, 顾晓辉, 方道红. 脉冲点火电路设计及其安全性分析[J]. 兵工自动化, 2014, 33(5): 65-68.
- [7] 徐建国, 陈玲, 金昌根, 等. 电火工品发火可靠性数字化测试技术研究[J]. 兵工自动化, 2012, 31(3): 69-70.
- [8] 王鹏, 杜志明. 桥丝式电火工品热点火理论[J]. 火工品, 2007(4): 26-30.
- [9] 王旭明, 于凤全, 朱晓飞, 等. 基于 Simulink/Stateflow 的某型战机燃油系统功能仿真[J]. 兵工自动化, 2018, 37(4): 47-48.
- [10] 贺广松, 李新洪, 王谦, 等. 基于 Matlab/Simulink 的无人飞行器导航精度分析[J]. 兵工自动化, 2017, 36(9): 8-9.