

·光电系统·

## 光电混合安全点火系统设计分析

张 明, 谌国森

(92941 部队, 辽宁 葫芦岛 125001)

**摘 要:**从光电混合点火系统基本原理描述出发,在比较2种光电混合点火基本方案基础上,构建了能量和密码独立传输、能源和点火分别采用密码控制的光电混合点火系统总体方案。比较了基于双光纤系统中光源组件和点火装置之间的2种接口方式的优缺点。构建的系统方案遵循了安全设计原则,同时又考虑了其可实现性。分析了系统各组件特性,对其性能进行了测试和分析。

**关键词:**光电点火;半导体桥;光密码;单次试开

中图分类号:TN243

文献标识码:A

文章编号:1673-1255(2012)01-0005-04

## Analysis and Design of Electro-optical Hybrid Ignition System

ZHANG Ming, CHEN Guo-sen

(92941 Army Unit, Huludao 125001, China)

**Abstract:** From the basic principle of the electro-optical hybrid ignition system and based on the comparison of two basic plans of the electro-optical hybrid ignition, the energy and the password independent transmission are constructed, the overall scheme of the electro-optical hybrid ignition system controlled by password is used respectively by the source and ignition. The advantage and disadvantage of two interface types between the light source and ignition system based on the dual fiber system are compared. The construction of the system follows the principle of safety design and also considers its realizability. The characteristics of the various components are analyzed and their performances are tested and analyzed.

**Key words:** electro-optical ignition; semiconductor bridge (SCB); optical code; single unclosing unit

从20世纪60年代起,国外的许多国家就竞相致力于激光点火技术的研究。20世纪80年代中期,随着激光器小型化及激光二极管、低损耗光纤的出现与应用,进一步推动了激光点火系统的发展。20世纪90年代后期美国能源部、国防部、航天局都把激光点火系统的研制列入今后重点项目<sup>[1]</sup>。

研究光电混合点火主要原因是这种新型技术具有固有的安全性。就元件而言,不受电磁辐射、静电的影响;就整个系统而言,炸药和烟火剂与电源系统达到了隔离,遵循“能量不相容”和“隔离”设计原则<sup>[2]</sup>,因此从元件和整体系统上都使它的安全性得以加强。

### 1 光电混合点火方案选择

光电混合点火利用外界提供的光能和光信息,将其转换为电能和电信息,解释信息,只要符合预定程序,控制电能对点火元件点火。一旦异常就将电能耗散,禁止点火。图1是一种典型的光电混合点火的基本原理框图<sup>[5]</sup>。

点火装置的能量和信号均是光,为使系统尽量简单,首先考虑的是将能量和信息传输通道复用<sup>[6]</sup>,如图2所示,在光源组件端,首先将电密码产生器输出的信号进行调制,输入到激光控制器,使激光器先产生连续光,传输点火室需要的能量,然后产生脉冲

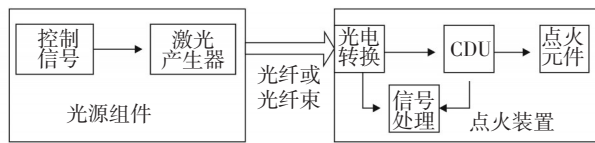


图1 光电混合点火的基本原理框图

激光脉冲信号。在接收端,光电转换器接收光能,一方面将其转换为电能,并将能量存储在CDU储能电容中;另一方面,解复用器将能量和信息分离,进行必要的信号处理后,输出一定的控制信号使CDU电容对点火元件放电,或者将电容上已存储的电能从另一通路泄放,以达到安全点火的目的。

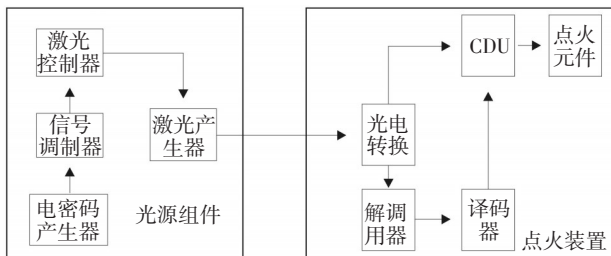


图2 单光纤型光电混合点火系统原理框图

显然,点火装置对能量的要求来说,需要激光器发射的是连续光,而且希望光功率尽量高,而光信息的传输要求激光器发射脉冲,因而需要连续光和脉冲光在同一激光器中产生。但从目前国内外激光器研究情况看,这样的激光器结构比较复杂,而且在工程实现比较困难。

与上述方案相比,光能量传输通道和光信息传输通道各自独立的方式更容易实现,也是文中最终选择的方案。该方案的点火装置由能量通道和信息通道组成,能量通道上激光器发射的准连续激光经过光纤传输,照射到光电池阵列上,经过光电池阵列转换成电能,为电容器充电并处于等待状态;在希望点火时,信息通道上的光密码发送电路发射一组光密码,经过另一光纤传输到接收器进行光电变换后,译码器对这组密码进行鉴别,允许系统只用预定特征的密码解除保险,触发电火开关,实现点火。

## 2 光电混合点火总系统构成

基于小型串联光电池阵列和SCB低压低能点火器的光电混合安全与点火系统如图3所示:由初始的电源系统、激光二极管及其驱动模块、光纤、光电池阵列、电容器、SCB和可控硅开关(SCR)构成能量通道,由密码发送器组件(LED或LD及其相连电路)、接收器和译码器构成信息通道。

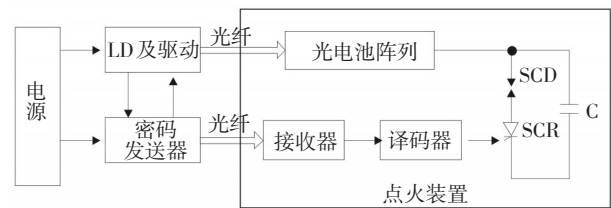


图3 光电混合安全点火系统框图

在点火装置外面,二极管激光器在密码发送器的电密码控制下,打开电源,电源能量被激光器转换成光能,光能经过光纤耦合进入点火装置内部,在内部,光能又被光电池阵列转换回电能,该电能为一小型化的电容器充电并处于等待状态;在希望点火时,安全点火控制系统的密码发送器将带有密码信息的电脉冲转换为光纤传输的光脉冲,接收器进行反变换,将接收到的光信号转换成电脉冲,译码器对该电脉冲进行逻辑识别,允许系统只用预定特征的密码解除保险,触发可控硅开关(SCR),实现SCB点火。

安全控制子系统主要完成2种任务,其一是控制激光器产生激光;其二是控制点火装置点火。首先,密码发送器对激光器部分输入密码,并于激光器控制电路内部预存码一致时,激光器开启,产生通过光纤传输光能。能量传输光纤将光能输入到点火装置,点火装置内部光电池阵列将光能转换为电能,并预存到内部储能电容中,以备点火和内部电路工作耗电。当预充电完成后,给密码电路返回“待命”信号,表明点火装置已经就绪,完成第一任务。当外部系统要求需要点火时,通过密码发送器发生另外密码,通过光纤传输到点火装置,点火装置内部电路接收光密码,并进行逐位鉴别,当密码相符时,打点火开关,实现点火;当与内部预存码不同时,开启另一路开关,使预先存储的电能消耗,并使充电回路断开,永久失效,实现单次试开,完成第二任务。

该点火系统具有以下优点:

(1)组件被放置在一个有电磁屏蔽的金属盒内,对外无任何电缆接口,只有光纤连接的微小窗口,几乎完全隔绝了电磁辐射和静电的耦合途径,实现了能量隔离,形成能量禁区,达到了安全设计要求的“隔离”原则。

(2)点火受光密码控制,自然界中产生与点火装置所承认的相同信息的概率小于 $10^{-6}$ ,发生误爆的概率极小,大大提高了系统的非授权使用控制能力,达到了安全设计要求的“信息不兼容”原则。

(3)单次试开功能使得系统在非密码企图点火

时点火装置永久失效,并立即耗尽内部储能。一方面使系统恢复到能量隔离状态,另一方面又一定程度上达到了“失效”原则的设计要求。

(4)激光器的开启也受密码控制,对能量的产生也进行了“信息不相容”处理,使系统安全性进一步提高。

(5)由于该点火系统只要求适度的激光功率水平,可选用小型激光二极管作光源;点火元件选用具有低能量起爆优点的SCB。一方面可以使系统可实现性更强,另一方面可以减小系统体积。

总之,构建的光电混合点火系统方案遵循了安全设计原则,同时又考虑了其可实现性。

### 3 系统关键组件的选择

根据对通用的光电混合点火系统分析,选择的组件方案为:

#### (1)光源

光源为小型激光二极管(LD),发射波长为810 nm,出纤功率约为1 W,驱动电路采用标准的LD驱动模块。

#### (2)能量传输与耦合

光能传输光纤实现,这就涉及到光纤的耦合。对光纤耦合的要求主要是使耦合损失小,同时在实际的系统中使各部分的耦合连接简单方便。系统涉及的光纤耦合包括激光器发光面与光纤的耦合和光电池阵列与光纤的耦合。针对前者,因为激光二极管的发光面积很小,只要光纤和发光面靠得足够近,激光器所发出的光都能照到光纤端面上,但光纤只能接收2倍数值孔径的那部分光能,传输效率很低,可行的方法是将光纤端面做成一个半球形,使它起到短焦距透镜的作用。针对后者,由于光纤的芯径很细,一般为几微米到几百微米,而光电池阵列尺寸较大。为提高二者之间的耦合效率,选择透镜耦合。

#### (3)点火元件

点火元件选用SCB。一般来讲,希望有一种尽可能小能量动作的点火装置,以把光电混合点火系统的性能发挥到最大限度,并把其尺寸减到最小。常规热桥丝(Hotwire)点火装置需要几十毫焦能量,爆炸桥丝(EBW)和爆炸箔起爆器(EFI)需要能量也近1 J<sup>[7]</sup>,并且这些点火装置典型需要1 kV或更高的驱动电压,需要DC/DC过程。而SCB只需要3~5毫焦能量它就能工作,典型的驱动电压小于30 V,因此可以直接应用光电池阵列的输出,无需DC/DC变换<sup>[8]</sup>。

#### (4)光电转换器

光电转换器选用砷化钾光电池阵列。对于窄带的激光光源应用,光电池可能得到更高的转换效率,因为通常的激光二极管只发射适当大于光电池禁带宽度的谱线,既保证入射的光子得到充分吸收又不至于造成过渡的热损耗。相对硅材料制造的光电池,砷化钾具有更高的转换效率。由于单结光电池的输出电压很低,对于几十伏应用场合需要多个单体串联。

#### (5)电容充放电单元

为适应光电池阵列输出和发火元件,电容器放电单元(CDU)中的点火开关选用可控硅(SCR)。电容选择以适应SCB发火要求为准。

#### (6)安全点火控制子系统

安全点火控制子系统以目前光纤通信技术调制、传输和解调技术为基础进行设计,由密码发送器组件、光纤和接收器组件构成。密码发送器组件由发光二极管(LED)或和与其相连的电子线路所组成;接收组件由PIN二极管、信号处理电路组成。子系统要求安全失效率设计指标小于 $10^{-6}$ ;能用密码解除保险,只允许单次试开。

## 4 系统主要硬件构成

光电混合安全点火系统主要由三部分组成:

#### (1)密码发送器

密码发送器内部具有2路密码产生器。一路通过电缆与激光器连接,用于控制激光器产生激光;另一路产生光密码信号,通过密码传输光纤连接到点火装置,控制点火。

#### (2)激光器

激光器内部包括激光产生器本身和密码控制电路。密码控制电路在密码发送器产生的电密码控制下,开启激光器。

#### (3)点火装置

点火装置为一个52 mm×49 mm×31 mm小金属屏蔽盒,内部装入了光电池阵列、SCB、单次试开熔断器以及相应的点火控制电路。点火装置接收能量光纤输入光能,将光能转换为电能,存储在内部电容中。在光密码控制下实现点火,或者实现单次试开功能,使装置失效;它与外部激光二极管和密码发送器控制电路仅通过两根光纤相连,以在电磁环境中获得安全保障。

## 5 系统性能测试

系统的安全失效率设计指标小于 $10^{-6}$ ,能用密码解除保险,只允许单次试开,在激光源输入光激励下可靠使SCB点火。

### 5.1 密码控制下SCB正常点火

利用密码装定器对5片TMS3637写入密码和工作方式控制位,将其分别标识为 $TS1$ 、 $TS2$ 、 $TS3$ 、 $RV1$ 和 $RV2$ 。其中 $TS1$ 、 $TS2$ 、 $TS3$ 配置成发射方式,密码各不相同; $RV1$ 和 $RV2$ 配置成接收方式, $RV1$ 中密码与 $TS1$ 相同, $RV2$ 中密码与 $TS2$ 相同。将 $TS1$ 置入密码发送器中激光器开启密码产生器电路, $TS2$ 置入密码发送器中点火密码产生电路, $RV1$ 置入激光器内部密码控制电路, $RV2$ 置入点火装置密码鉴别电路。系统加电,进入以下测试程序<sup>[9]</sup>。

按下光电密码发射电路上的充电按钮,光电密码发射电路通过电缆向LD驱动电路发射密码,通过密码验证正确后则开启LD,并反馈一个电平信号,标志着系统正常充电,充电指示灯亮。当充电完成后点火就绪指示灯点亮,标志着系统处于准备状态。此时按下点火按钮,光电密码发射电路通过光纤向位于点火装置内的光密码接收与鉴别电路发射点火光密码。光密码通过转换、鉴别正确后,触发SCR点火开关,电容器开始对SCB放电,SCB气化形成高温等离子体,击穿附近空气,发出火光并伴随“扑”的响声,实现了正常点火。

### 5.2 单次试开功能验证

将光电密码发射电路中的 $TS2$ 更换 $TS3$ ,使得发射密码和预存的密码不相同。重复上述测试程序。此时单次试开回路上的SCR开关导通,系统通过熔断器和续流泄放电容器储能,并断开充电回路,使装置永久处于无能量状态,实现了单次试开。

### 5.3 点火系统其他性能测试

除对密码控制下正常点火和单次试开等主要功能验证外还对点火系统其他相关指标完成了测试,其中包括:

(1)激光器输出功率

利用LPE-1B型激光功率能量计测量。

(2)点火装置充电时间

对于光电混合安全点火系统来说,点火装置又称能量禁区。充电过程实际上是点火装置的能量积累过程,直到能量积累到足以使SCB发火。从某种角度看,能量积累过程也就是从安全状态到不安全状态的过渡过程。过程时间越短,意外发火的可能性就越小,安全性也就越高。

(3)电容储能

点火装置内,CDU单元储能电容为2个 $6.8\ \mu\text{F}$ 电容并联。在充电(点火装置充电时间)时,CDU的条件足以使SCB点火。

## 6 结束语

对光电混合点火系统理论研究的基础上,提出了光电混合点火控制系统双光纤传输的控制方案,分析了系统各组件特性。在系统中仅由2路光信号进入点火禁区实施安全点火,采用不同的密码控制光电换能与预定点火,既保证了正常情况的可靠点火又保证了异常情况的安全控制。

## 参考文献

- [1] 费三国.半导体桥起爆装置在激光点火系统中的应用[C]//中国电子学会第七届学术年会论文集,2001.
- [2] 施敏.半导体物理[M].北京:电子工业出版社,1987.
- [3] 祝逢春,等.半导体桥火工品研究新进展[J].兵工学报,2003,32(1):18-22.
- [4] 刘颂豪.光纤传感器的新进展[J].光电子技术与信息,2003,16(1):1-8.
- [5] 杜连明,等.光密码点火控制电路的设计[J].兵工自动化,2007,26(4):83-84.
- [6] Tudor Zisu, Bucharest, Romania, et al. Fiber optics explosion primer[C]//Aland K.Chin, ed. Testing, Reliability, and Applications of Optoelectronic Devices. 4285:122-126.
- [7] Ron V. Electric Detonator: EBW and EFL. Propellants. Explosive, Pyrotechnics.V21(3),2009.
- [8] 王凯民,温玉全.军用火工品设计技术[M].北京:国防工业出版社,2009.
- [9] 韩大勇.单片集成不发火电路的半导体桥的设计研究[D].上海:上海交通大学,2008.