

• 综合评述 •

单光纤激光点火控制系统的研制

钟海文^{1,2}, 代媛媛^{1,3}, 宋丽民^{1,3}, 曹军胜¹, 高志坚¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033;
2. 中国科学院大学 北京 100049;
3. 中国科学技术大学 合肥 230026)

摘要: 根据单光纤激光点火装置的功能需求, 研制了单光纤激光点火样机的控制系统, 该系统采用双波长单光纤的光路设计结构, 与单光源双光纤结构相比具有更高的可靠性与安全性。系统主要包含人机通信模块、激光器驱动模块、光电转换模块、点火时间测量模块、安保模块等几个部分。以触摸屏作为人机交互的界面与主控制器之间进行相互通信, 实现对各个功能模块的控制。利用 MDK 开发工具设计了系统软件, 并进行了整机输出测试。结果表明: 安保模块中光开关的插入损耗小于 3 dB; 当检测激光功率为 1 mW、脉宽为 20 ms 时, 检测电压大于 1.2 V, 表明系统光路具有连续性; 整机输出功率与设置功率的最大偏差不超过 3%。

关键词: 半导体激光器; 控制系统; 激光点火

中图分类号: TN248 文献标识码: A DOI 编码: 10.14016/j.cnki.jgzz.2020.01.001

Development of single fiber laser ignition control system

ZHONG Haiwen^{1,2}, DAI Yuanyuan^{1,3}, SONG Limin^{1,3}, CAO Junsheng¹, GAO Zhijian¹

(1. Fine Mechanics and Physics, Changchun Institute of Optics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
3. University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

Abstract: According to the functional requirements of the single fiber laser ignition prototype, the control system of the single fiber laser ignition prototype is developed, the system adopts a dual-wavelength single-fiber optical path design structure, which has higher reliability and safety than a single-source dual-fiber structure. The system mainly includes human-machine interaction interface, laser driving module, photoelectric conversion module, ignition time measurement module, security module and other parts. The touch screen is used as a human-computer interaction interface to communicate with the main controller to realize the control of each functional module. The system software is designed with MDK development tools, and the whole machine output test is carried out.

Key words: semiconductor laser; control system; laser ignition

1 引言

传统的点火技术采用热电阻丝进行点火, 该点火技术具有点火能量小、点火时间短、控制简单等优点, 现代战场和武器系统内部普遍存在电磁干扰, 而传统点火技术抗电磁干扰能力差, 无法保证电火工品的安

全性^[1-3]。

随着半导体激光器的迅速发展, 在国防、工业、航天、医疗等领域都取得了广泛的应用^[4-9]。半导体激光器以及光纤技术的发展促进了激光点火技术的产生和发展。光纤可以实现含能材料和电系统之间的相互隔离, 从根本上消除了电磁环境对火工品造成的安全隐患^[10-13]。

在研究了前期激光点火技术的基础上, 研制了具有测量点火时间、点火信号同步输出、安全保护、人机交互等功能的单光纤激光点火控制系统, 并对该系统进行了一系列的测试实验, 测量了设定激光功率和输

收稿日期: 2019-07-30

基金项目: 国家重点研发计划课题(No.2018YFB0407303)

作者简介: 钟海文(1994-), 女, 硕士研究生, 主要从事电路与系统方面的研究。E-mail: 2245215060@qq.com

通信作者: 曹军胜(1978-), 男, 博士, 硕士生导师, 主要从事电路与系统方面的研究。E-mail: caojcs@jlu.edu.cn

<http://www.laserjournal.cn>

出功率的最大偏差、光开关的损耗及延时时间、光路检测等特性。

2 控制系统的组成

单光纤激光点火控制系统的结构如图 1 所示, 主要包含激光器驱动模块、安保模块、隔离模块、人机通信模块、主控制器模块等。主控制器实现对系统中各个功能模块的驱动、指令信息的传输与处理, 控制整个系统有条不紊地运行。激光器驱动模块主要实现对激光器输出功率和脉宽的控制。安保模块的主要

功能是防止系统意外点火, 本系统设置了电子、机械双重安保。同步信号输出模块主要实现点火信号的同步输出, 可用第三方设备观察。点火时间测量模块可实现对该时间的测量, 系统点火时间是指起爆器接收光照到起爆器靶线炸断所用的时间。操作者在人机界面对激光器的工作模式、输出功率、输出脉宽等参数进行配置时, 人机通信模块根据要求生成对应的指令代码, 并通过串口线传输给主控制器, 主控制对接收的指令进行处理, 通过 GPIO、UART 外设实现对各个功能模块的控制。

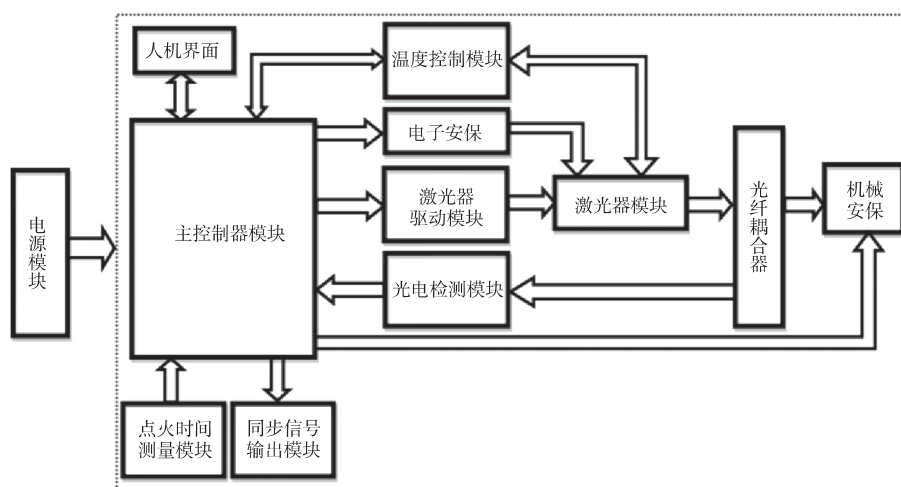


图 1 激光点火控制系统结构

2.1 光路设计

光路设计主要依据光路连续性自检的方法, 本系统采用双波长单光纤的光路设计结构, 如图 2 所示, 脉冲光源包含 1 310 nm 和 976 nm 两种不同波长的激光, 1 310 nm 的激光用来检测光路的连续性, 976 nm 的激光用来引燃起爆器。本系统采用的是分光比为 9:1 的光纤耦合器, 耦合器的③端镀有光学膜, 经仿真实验获得 980 nm 和 1 310 nm 激光通过光学膜的效率图, 如图 3、图 4 所示, 该光学膜对 980 nm 的激光有增透作用, 而对 1 310 nm 的激光有高反射的作用。波长为 1 310 nm 的检测脉冲光源产生功率为 P_0 的矩形单脉冲激光, 从光纤耦合器①端输入, 90% 的光功率从③端输出, 经③端的反射膜反射后再从②端输出, 光电检测模块将②端输出的光信号转换为电压信号传递给主控制器, 经主控制器处理后, 获得检测结果, 根据检测结果判断光路的连续性。波长为 976 nm 点火激光从光纤耦合器的①端输入, 90% 的光功率从③端输出, 经过③端的增透膜传输到起爆器。

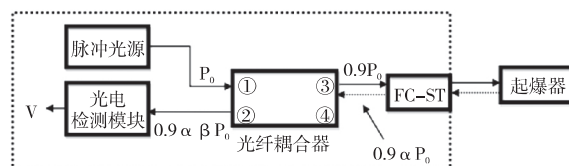


图 2 基于光纤耦合器的光路检测示意图

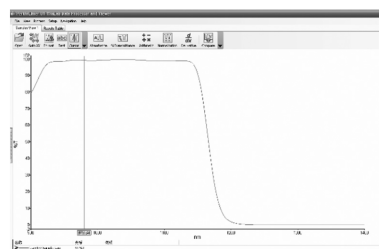


图 3 980 nm 激光通过光学膜效率

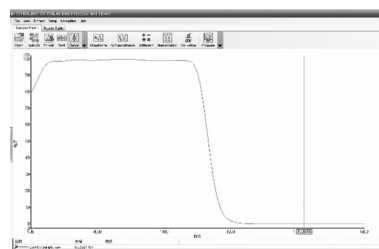


图 4 1 310 nm 激光通过光学膜效率

2.2 软硬件设计

2.2.1 激光器驱动模块

激光点火系统中的半导体激光器工作在单脉冲模式下,脉冲宽度、幅度均可调节。本系统设计的激光器驱动电路包含点火激光器驱动电路、检测激光器驱动电路两个部分。点火激光器的驱动电路如图 5 所示,在驱动电路的输入端增加了模拟开关,驱动电路输出的脉宽由模拟开关控制。模拟开关的右侧为压控恒流源电路,恒流源输出电流的大小由模数转换器 DAC 的输出电压决定。激光器驱动电路是集成了运算放大、图腾柱、MOS 管等模块的压控恒流源电路,输入信号由模拟开关输入,经两级反向放大后,运放 LM358 输出的信号通过一个图腾柱放大电路,经图腾柱电路放大的信号通过驱动 MOS 管的栅极使 MOS 管打开。MOS 管经信号驱动后工作在饱和区,利用其工作在饱和区的特点实现输出电流的稳定。检测激光器的驱动电路如图 6 所示,电路输入信号的脉宽、幅值均由主控制器决定。驱动电路采用三极管作为电路开关,三激光打开状态下工作于放大区,利用其共工作在放大区的特点使输出电流稳定。主控制器通过驱动三极管实现对激光器的驱动。

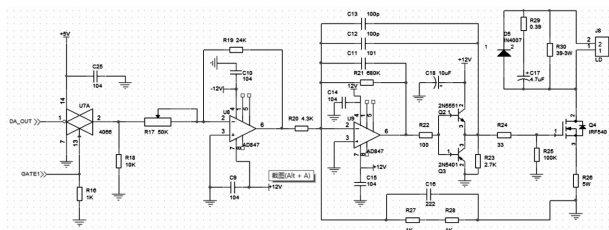


图 5 激光器驱动电路

2.2.2 安保模块

激光点火系统需要具有很高的安全性,因此需要设计专门的安保电路以防止意外发火。本系统设置了电子、机械双重安保,电子安保主要实现对激光器的防静电、防浪涌保护,机械安保主要通过阻止激光到达起爆器实现保护功能。电子安保的电路如图 6 所示,常闭继电器并联于激光器的正负极,激光器处于短路状态,系统关闭状态下产生的静电不会对处于短路状态的激光器产生影响;短路状态的激光器也不会受到系统上电时浪涌的影响。光开关是机械安保模块的主要部件,其串联在激光器与起爆器的光纤通路中,使得光路处于常闭状态,仅当系统处于点火状态时,光开关打开,光路处于畅通状态,光开关的驱动电路如图 7 所示。

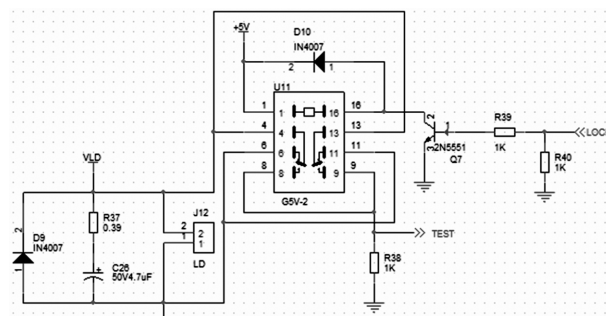


图 6 电子安保电路

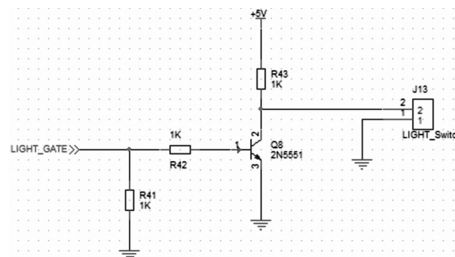


图 7 光开关驱动电路

2.2.3 隔离模块

本系统设计的点火时间测量模块与同步信号输出模块均包含隔离模块,隔离模块主要由金升阳隔离电源和光耦组成,金升阳隔离电源使输入和输出电源信号不共地,即使在其中一端有干扰或者脉冲存在时,由于相互隔离而不会影响到其他部分,保护系统的安全性。点火时间测量模块可以实现系统点火时间测量的功能,系统的点火时间是指起爆器接收光照到起爆器靶线炸断所用的时间,点火时间测量电路如图 8 所示,电路的输入端与输出端分别与起爆器靶线、主控器的中断口相连。根据比较器原理,当起爆器靶线未断时,输出端输出高电平,当靶线断开时,输出端电压由高变低,触发主控制器的外部中断。同步信号输出模块主要实现点火信号的同步输出,其输出信号可用第三方设备观察。同步输出电路如图 9 所示,其输入信号与激光器驱动模块的输入信号相同,根据光耦合器原理,当输入信号为高电平时,三极管会处于导通的状态,BNC 接口输出高电平,当输入信号为低电平时,三极管处于截止状态,BNC 输出低电平,以此实现点火信号的同步输出。

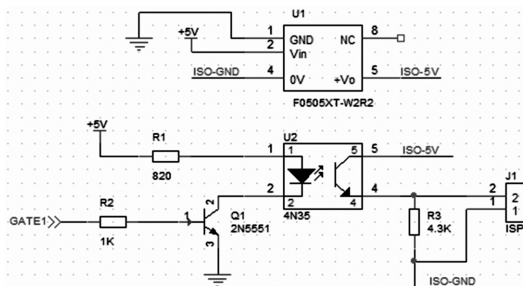


图 8 同步信号输出电路

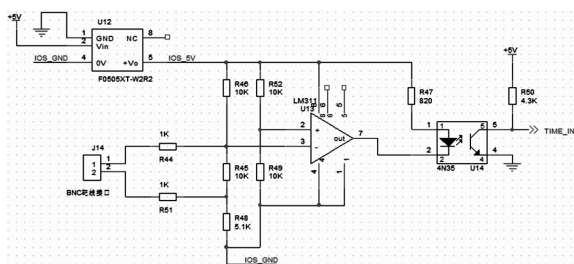


图9 点火时间测量电路

2.2.4 人机通信模块

本系统的人机界面采用大彩公司生产的 DC10600B070 系列触摸屏,该触摸屏是一款组态串口屏,包含多种常用的组态控件指令,如按键控件、文本控件、进度条控件等。本系统中,人机界面上的每一个控件具有唯一的 ID,当操作者在触摸屏上按下按键或输入文本信息,主控制器串口就会接收到人机界面传送的组态控件指令,主控制器对控件指令进行处理后,即可获取控件的 ID、属性、文本等信息。主控制器也会发送指令给人机通信模块,人机通信模块对指令进行解析后,触摸屏对应的控件 ID 上会显示该指令信息,以此实现主控制器与人机界面之间的信息传递。

2.2.5 光电检测模块

点火系统中光路的连续性是决定系统点火成败的关键因素,激光火工品系统在进行点火之前需对光通路的连续性进行检测,光电检测模块可实现光路的连续性检测。光电检测电路如图 10 所示,其中 J10 与外置 PD 相连,光电检测模块通过外置 PD 实现对检测光的采集并将采集的光信号转换为电信号,检测模块右侧的电路将 PD 转换的电信号进行放大。主控制器会对放大后的电信号进行接收和处理,并将其传输给人机通信模块,人机通信模块将解析后的电信号显示在触摸屏界面对应的位置。操作者根据触摸屏界面显示的检测数据对光路的连续性进行判断,确定系统光路是否连续。

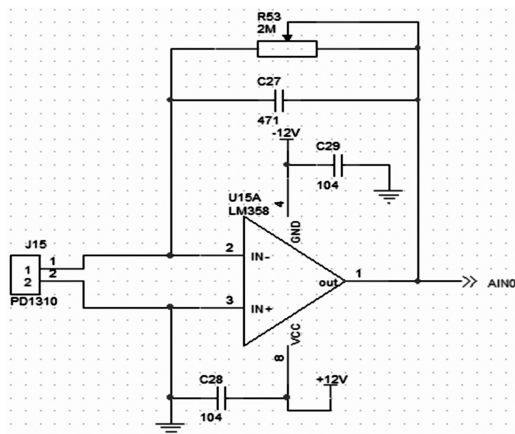


图10 光电检测电路

2.2.6 系统软件设计

本系统控制软件在 keil MDK 开发平台中使用 C 语言进行设计,根据系统的工作流程,将其划分为三种状态:初始化状态、设置状态、点火状态。初始化状态主要实现对系统的初始化,包括定时器初始化、DAC 芯片初始化、UART 初始化、系统时钟初始化、GPIO 初始化。设置状态下,用户完成激光器温度参数的设定或读取、激光器波长选择、激光输出功率、激光输出脉宽等参数设定。此时,按下触摸屏的启动按键,控制系统处于点火状态,由于控制系统是以脉冲形式点火,当激光输出时间等于脉冲宽度时,触摸屏按键自动抬起,控制系统从点火状态回到设置状态。当控制系统完成点火时,触摸屏对应的空间位置会显示系统的点火时间。主程序的流程图如图 11 所示。

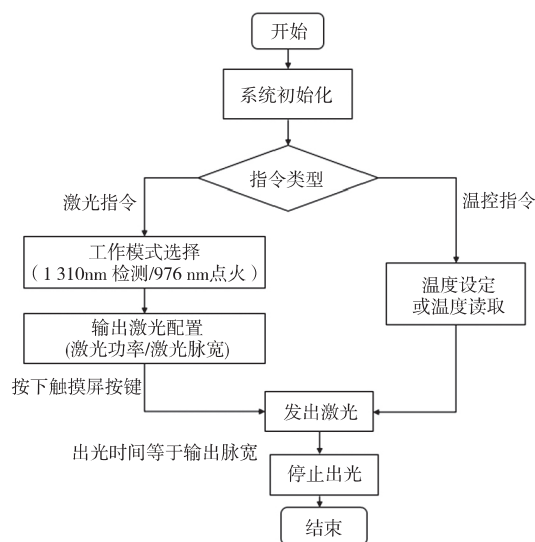


图11 控制系统主程序流程图

3 测试与实验结果

3.1 安保模块的插入损耗及延时测试

激光点火系统对安全性要求很高,一旦出现意外发火,可能会造成很大的损失。在本系统中设置了电子和机械双重安保,安保模块在提高系统安全性的同时,也会对激光输出产生一定的插入损耗和输出延时。安保电路的插入损耗和输出延时主要来源于光开关,本实验将对系统中光开关的插入损耗和延时时间进行测量。本实验中,系统设置为点火模式、脉宽 100 ms 的单脉冲模式,此处使用 InGaAs 探测器对光电信号进行转换,使用高精度的光功率计 OPHIR 分别对有无光开关的输出功率进行测量,并用示波器对光开关的延时时间进行测量,设置目标功率从 100 mW 开始,每隔 100 mW 记录一次当前实际出光功

率,共记录 10 组数据,并用示波器记录输出功率为 1 W 时光开关的延时时间。如图 12、13 所示,光开关在激光功率为 1 W 时的延时时间为 1.901 ms。光开关的插入损耗如表 1 所示,光开关的插入损耗公式如 (1) 所示:

$$\text{光开关插入损耗(Insertion Loss)} = 20\lg(P_r/P_t) \quad (1)$$

P_r : 未光开关输出的能量

P_t : 加光开关输出的能量

表 1 光开关的插入损耗

目标功率 (mW)	输出脉宽 (ms)	未加光 开关输出 的能量(mJ)	加光开关 输出的 能量(mJ)	光开关 插入损耗 (dB)
100	100	10. 17	7. 59	2. 54
200	100	20. 50	14. 92	2. 75
300	100	29. 60	21. 60	2. 73
400	100	40. 20	29. 10	2. 80
500	100	49. 90	35. 40	2. 98
600	100	60. 50	43. 30	2. 90
700	100	70. 20	50. 80	2. 80
800	100	79. 70	58. 40	2. 70
900	100	90. 20	65. 50	2. 77
1 000	100	100. 40	71. 50	2. 94

由于激光器 P-I 特性拟合、光功率探头存在误差以及光纤接头的插入损耗等因素,未加光开关的激光输出与设置的目标功率之间存在偏差。测试结果表明光开关的插入损耗不超过 3 dB。

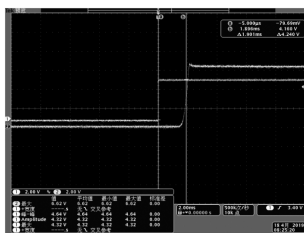


图 12 激光输入光开关时的延时时间

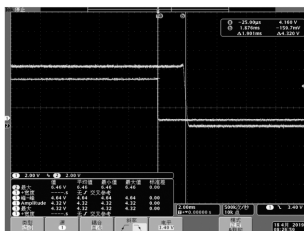


图 13 激光输出光开关的延时时间

3.2 点火输出功率的测试

激光功率对激光点火有重要的影响,保证实际输

出的激光功率与设置的目标功率一致对点火系统的工程化应用具有重要意义。根据激光器的 P-I 特性,通过精准控制激光器驱动模块的输出电流,就能实现对输出激光功率的控制。本实验将验证激光输出功率的精确度。本实验中,系统设置为点火模式、脉宽 100 ms 的单脉冲模式,使用高精度的 OPHIR 光功率计对实际出光功率进行测量,设置目标功率从 100 mW 开始,每隔 100 mW 记录一次当前实际输出功率,共测 10 组数据,并计算偏差,激光点火的实际输出功率如表 2 所示。

表 2 整机输出光功率测试结果

目标功率 (mW)	输出脉宽 (ms)	目标能量 (mJ)	实测能量 (mJ)	偏差率 (%)
100	100	10	10. 17	1. 7
200	100	20	20. 50	2. 5
300	100	30	29. 60	1. 3
400	100	40	40. 20	0. 5
500	100	50	49. 90	0. 2
600	100	60	60. 50	0. 8
700	100	70	70. 20	0. 3
800	100	80	79. 70	0. 4
900	100	90	90. 20	0. 2
1 000	100	100	100. 40	0. 4

由于激光器 P-I 特性拟合误差和光功率探头损耗等因素,实际输出功率与设置的目标功率之间存在偏差。测试结果表明,激光点火系统的实际输出与目标输出的偏差最大值不超过 3%。

3.3 光路检测输出测试

激光点火系统的光通路是影响点火成败的关键因素^[14]。在点火之前需对系统的光通路进行检测,以确保光路的连续性。本实验将对光路连续的条件进行验证。本实验中,光路传输过程如图 14 所示,其中光纤耦合器的分光比是 9 : 1,系统设置为工作脉宽 20 ms、输入光功率 1 mW 的单脉冲检测模式,使用 In-GaAs 探测器进行光—电转换。光路检测结果如表 3 所示。

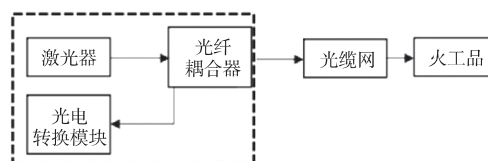


图 14 光路传输过程

表 3 光路检测结果

输出功率 (mW)	输出脉宽 (ms)	检测电压 (V)	是否可以 正常点火
1	20	1. 23	是
1	20	1. 21	是
1	20	1. 21	是
1	20	1. 23	是
1	20	1. 22	是

实验结果表明,在检测光功率为 1 mW、脉宽为 20 ms 的条件下,检测电压为大于 1.2 V 时,系统光路具有连续性。

4 结论

根据激光点火样机的要求,设计了其控制系统,并进行了测试,测试结果表明:安保电路中光开关的插入损耗不超过 3 dB,点火激光功率为 1 W 时光开关的延时时间是 1.901 ms;整机输出的激光功率与设置功率的偏差不超过 3%;当检测光功率为 1 mW、脉宽为 20 ms 时,若检测电压大于 1.2 V,则系统光路具有连续性。实现了基于单光纤点火控制系统的基本功能,包括对工作模式的选择、激光输出参数的配置及点火时间的测量,系统安全、稳定。

参考文献

[1] 赵兴海,高杨,赵翔.激光起爆技术研究进展[J].红外

与激光工程,2009,38(5):797-802+810.

- [2] 胡艳,沈瑞琪,叶迎华.激光点火技术的发展[J].含能材料,2000,(3):141-144.
- [3] 赵兴海,高杨,程永生.激光点火技术综述[J].激光技术,2007,31(3):306-310.
- [4] 曹军胜.半导体激光起爆试验研究[J].激光杂志,2014,35(10):29-32.
- [5] 曹军胜,彭宇航,等.一种单光纤结构的激光点火装置:中国 CN 104048565 A[P].2017-6-9.
- [6] 王悦勇,麻永平,程伟民,等.激光点火多路起爆关键技术及发展[J].火工品,2010,(1):53-56.
- [7] 曾雅琴,严楠,许灿啟,等.光路失效分析的检测方法研究[J].北京理工大学学报,2010,32(8):833-837.
- [8] David R.Sumper.Laser-Initiated Ordnance For Air-to-Air Missiles[C]//AIAA-93-2360.
- [9] 韦爱勇,郭学彬,张杰涛.常用火工品药剂激光起爆试验研究[J].含能材料,2004,12(4):243-245.
- [10] 曹军胜.集成化半导体激光点火系统[J].仪器仪表学报,2014,35(S1):54-58.
- [11] 刘贯虹.激光起爆器[J].西北大学学报(自然科学版),1988,18(2):69-73.
- [12] 崔卫东,朱升成,史红漫,等.光纤对激光起爆系统的影响[J].火工品,2000,(3):34-37.
- [13] 尹国福,鲁建存,刘彦义,等.激光火工品系统自动检测技术研究[J].测试技术学报,2010,24(4):344-350.
- [14] 叶志鹏,贾瑞,吴强.一种单光路激光点火系统通路分析方法[J].湖南大学学报(自然科学版),2019,46(4):122-127.