

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2013.01.014

# 基于光纤耦合的激光引信测试设备

徐国梁, 杜运通\*

(中航工业空空导弹研究院, 河南 洛阳 471009)

**摘要:** 为实现激光引信发射光功率和灵敏度的准确测量,将光纤耦合技术应用到激光引信测试设备的研制中,开展了激光引信原理和激光耦合光纤特性的分析,提出了一种基于光纤耦合半实物仿真的设计方案。采用带调整机构的激光耦合光纤装置设计,提高了光纤的耦合效率;采用基于衰减片组合的光学衰减机构设计和基于分光棱镜的光学系统设计,实现了激光引信回波的实时调整和准确测量;采用基于总线的实时测控系统设计和LabVIEW模块化软件设计,实现了良好的人机交互界面,最后用测量系统分析法对测量设备的精度、重现性和一致性进行了评估分析。研究表明,该系统能够准确测量激光引信的光功率和灵敏度,且测量精度和测量误差均满足要求。

**关键词:** 激光引信; 测试设备; 灵敏度; 光纤耦合; 激光功率

中图分类号: TJ43<sup>9.2</sup>; TP27; TH745 文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2013)01-0060-05

## Test equipment for laser fuze based on fiber coupled laser

XV Guo-liang, DU Yun-tong

(AVIC China Airborne Missile Academy, Luoyang 471009, China)

**Abstract:** In order to realize the accurate measurement of the laser fuze optical power and the sensitivity, the fiber coupling technique was applied to laser fuze test equipment. After the analysis of the principle of laser fuze and laser coupling optical fiber characteristic, a design scheme of based on the optical fiber coupling wan was presented. A fiber coupled laser device with adjusting mechanism was designed to improve the fiber coupling efficiency. The attenuation device based on attenuation sheet combination and the optical system based on beam splitting prism were designed, the real-time adjustment and accurate measurement of the laser fuze echo were realized. By using real time control system based on the CAN bus and LabVIEW software modularization design, a good human-computer interaction interface was achieved. By using the measurement system analysis method, the measuring equipment accuracy, reproducibility and consistency were analyzed. The results indicate that the system can accurately measure the laser fuze optical power, and sensitivity, measurement accuracy can meet the requirements.

**Key words:** laser fuze; test equipment; sensitivity; fiber coupled laser; laser power

## 0 引言

激光引信是随着现代作战环境的变化和激光技术的迅猛发展而出现的一种近炸引信,目前已广泛应用于空空、地空等导弹中<sup>[1-2]</sup>。为了能够测量激光引信激光发射功率和对激光回波的响应能力,要求激光引信测试设备能够实时模拟激光回波,并对激光回波的功率和引信的响应进行测量,激光回波应能满足激光

引信时序要求。

目前,激光引信测试设备采用的是发射机和接收机分别测量的方法。当前实用化的激光光束参数测量仪基本采用图像式设计,即用CCD图像传感器采集光斑图像,通过图像采集卡送入PC机,并通过对光斑图像光强分布的分析得出各种参数值<sup>[3]</sup>。接收机测量系统则是由标准辐射源产生标准信号,接收机接收辐射信号,输出信号经放大后输入到示波器及其他相关

收稿日期: 2012-08-21

作者简介: 徐国梁(1980-),男,安徽潜山人,主要从事空空导弹激光引信测试方法方面的研究。E-mail: yinheniao@163.com

通信联系人: 杜运通,男,高级工程师。E-mail: dyt2011year@126.com

仪器中进行数据分析。这种方法需要较大的光学平台,而平台价格昂贵,同时又不能很好地模拟激光引信的回波信号。

本研究设计的激光引信测试设备采用基于光纤耦合半实物仿真方案,将激光引信输出激光耦合到光纤中,经过处理后再送入激光引信的接收机;最后,对该系统进行试验以验证优化的光纤耦合设计能够达到较高的测试精度。

## 1 激光引信原理及测试方法选择

激光引信是利用激光束探测目标的引信,一般激光引信的组成包括激光发射机、激光接收机、信号处理电路和执行级电路组成<sup>[4]</sup>。空空导弹上使用的激光引信的激光发射机一般采用一定重复频率的脉冲激光。当目标被激光发射机照射,并位于接收机视场内时,激光接收机的探测器接收到部分目标漫发射光,经光电转换,将其转换为电信号。接收机的放大电路对电信号进行放大后,将其转换为数字信号送给信号处理系统。信号处理系统根据回波信号进行目标识别和干扰识别,当符合近炸引炸条件后,系统给出引炸信号给执行级;执行级进行功率驱动后,输出战斗部点火信号<sup>[5]</sup>。

### 1.1 激光发射机

空空导弹激光引信通常采用主动发射接收系统、窄脉冲激光体制和周视近炸方式。主动发射接收方式容易实现。窄脉冲方式能够实现较大脉冲峰值功率,而平均功率不会增加,可以有效地提高探测距离,增加激光器的使用寿命;同时采用窄脉冲方式可以方便地对激光进行编码,利于实现抗干扰和目标识别算法<sup>[6]</sup>。

发射机主要参数就是发射光功率,表征激光引信输出的激光能量大小。目前采用的测试方法有平均光功率计法和峰值功率检测法。

平均光功率计测量光功率后,再通过转换公式得到脉冲光功率。其优点是可以采集到精度较高的平均光功率计;缺点是平均光功率计无法直接测量峰值光功率,需要进行转换,其测试精度受到脉宽和重复频率的精度影响。

峰值检测法使用光电传感器接收激光信号,并将其转换为相应的电流信号;利用前置放大器完成电流信号到电压信号的转换;主放将其放大到合适幅度,输出到A/D或示波器等测量装置来测量信号幅度。其优点是可以实时对峰值光功率进行测量,同时能够对脉冲宽度和脉冲频率进行测量;缺点是其测试结果受光电转换效率、光学系统衰减和放大电路增益的影响,适用于测量精度要求较低的系统。

随着激光引信技术的发展,激光引信输出的脉冲宽度和频率稳定性较高,发射光峰值功率采用直接测量法,能够达到较高的测量精度。

### 1.2 激光接收机

激光引信接收机系统一般包括探测器、前放、接收光学系统、主放电路等组成。

探测器接收目标的漫发射激光后,通过光电转换将其转换为电信号,主放电路对信号进行放大后送到比较器,对信号幅度进行判别,并将其转换为数字信号后送信号处理电路<sup>[7]</sup>。

激光接收机主要参数为激光引信灵敏度,表征激光引信能够判定的最小接收光功率值。目前主要的实现途径有以下两种。

(1) 直接测量法。通过外加的可调光源,输入到激光引信的输入窗口,通过调节光源的功率来测量激光引信的灵敏度。这种方法的优点是光束准直性好、光功率调节简单、一致性和可靠性高。缺点是激光引信要求对输入的光信号宽度、波长、调制频率与激光引信的发射时钟同步,且满足判别系统的要求。激光器电源设计难度大,系统时钟同步难度大。

(2) 激光耦合半实物仿真测量。通过光学系统将激光引信发射出来的激光经过衰减后,送入接收窗口<sup>[8]</sup>。这种方法的优点是光信号的特征满足判决系统的要求,而且产品较为成熟,减少了设计风险,能最好地模仿实际的目标回波特性。但这种方法的测试精度受到激光耦合光纤的效率和光学系统衰减的影响,要想提高测试精度,必须要提高激光耦合光纤的效率。

## 2 设计方案

发射功率和接收灵敏度测试方法确定后,总体的设备框图如图1所示。

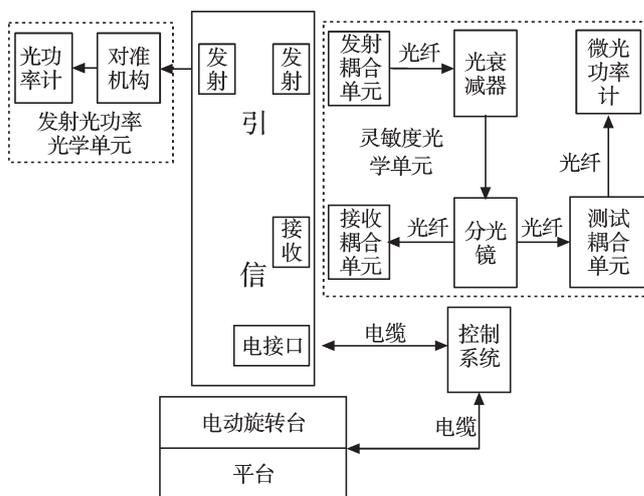


图1 设备总体框图

设备由光学平台、电动旋转台、控制系统、发射光功率光学测试单元和灵敏度光学单元组成。

发射光功率测量采用将光功率探头通过对准机构对准引信的发射窗口的方法进行测量。

灵敏度的测量采用半实物仿真的方法,通过分光棱镜得到输送到引信接收窗口的准确光功率值。通过调整可调衰减器,得到激光引信能够正常反应的最小输入光功率值,从而完成灵敏度的测量。

电信号的测量通过控制系统将信号切换到示波器的不同通道进行电压和频率的测量。

电动旋转台实现引信多个窗口的切换。

### 2.1 发射光功率测量单元

激光引信输出激光的位置精度由装配位置保证,其精度不高。激光光功率探头的光敏面一般较小,激光信号不能完全汇聚到探头的光敏面上。为提高测试精度,本研究将功率探头放置在3个轴向的调整机构上。Z轴调整探头与发射窗口的距离,在测试时紧贴产品;X、Y轴调整偏转方向和位置,保证激光全部落入光功率探头中。

### 2.2 灵敏度测量单元

灵敏度测量单元的系统图如图2所示。发射耦合透镜将发射激光耦合到光纤中,并在两者之间加上两片衰减片来进行定量衰减。光纤输出的激光通过分束棱镜分为两束,一束经过准直物镜将激光束进行准直后,送入产品接收窗口;另一束通过准直物镜和聚光镜将激光汇聚到光功率探头的光感面上。

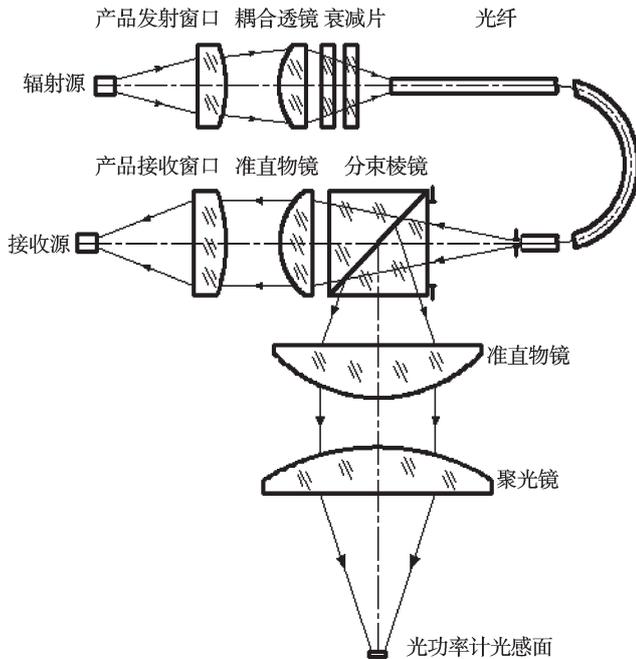


图2 灵敏度光学单元设计

这套系统的难点在于如何提高将发射激光耦合到光纤的耦合效率和如何实现准确的衰减。

### 2.2.1 激光耦合光纤设计

当光由空气传输至光纤时,根据全反射的条件,只有当入射角超过临界角时,才会发生全反射,只有满足这一条件,光才能在光纤中传播。根据文献记载,要求最大的入射角应满足<sup>[9]</sup>:

$$\sin a_{\max} = (n_1^2 - n_2^2)^{\frac{1}{2}} \tag{1}$$

式中:  $a_{\max}$  —最大的入射角度,  $n_1$  —纤芯的折射率,  $n_2$  —包层的折射率。

定义数值孔径  $NA = \sin a_{\max}$ , 以表征光纤收集光纤的能力。定义孔径角为  $2 a_{\max}$ , 只有在孔径角的圆锥内的光线才能在光纤中传播。

激光引信采用半导体激光器输出激光,输出光不是均匀的平面波,而是一种曲率半径和曲率中心都发生改变的非均匀球面波,通常称为高斯光束<sup>[10]</sup>,其传播特性符合<sup>[11]</sup>:

$$E(x,y,z) = \frac{A_0}{W(z)} \exp\left[-\frac{(x^2+y^2)}{W^2(z)}\right] \cdot \exp\left[-ik\left(\frac{x^2+y^2}{2R(z)} + z\right) + i\varphi(z)\right] \tag{2}$$

式中:  $E(x,y,z)$  一点  $(x,y,z)$  处的电矢量,  $W(z)$  —  $z$  点处的光斑半径,  $R(z)$  —  $z$  处的波阵面曲率半径,  $\varphi(z)$  — 与  $z$  有关的相位因子。

其中:

$$W(z) = W_0 \left[ 1 + \left( \frac{z\lambda}{\pi W_0^2} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \tag{3}$$

$$R(z) = z \left( 1 + \left( \frac{\pi W_0^2}{\lambda z} \right)^2 \right) \tag{4}$$

式中:  $W_0$  —高斯光束的束腰,是高斯光束的特性参数。

当  $W_0$  确定后,  $R(z)$  和  $W(z)$  等参数按  $z$  值变化并呈特定的函数关系,因此当高斯光束的束腰确定后,其高斯光束的传播特性就确定了。

光束在束腰处的光斑半径  $W_0$  最小,  $W(z)$  随  $z$  值的增大而增大,这表示光束逐渐发散。

当  $z = \pi W_0 / \lambda$  时,则近场发射角为:

$$\theta = \frac{\lambda}{\pi W_0} \tag{5}$$

通常  $z=0$  到此的距离称为高斯光束的准直距离,在此范围内光束发散角最小。

要想提高激光引信输出激光光纤耦合的效率,需要将聚光镜放置在激光引信的输出激光束腰处,聚焦后的光束腰斑应落于光纤端面上,且入射激光束、耦合透镜和光纤三者的光轴必须同轴。

耦合光路设计如图3所示。

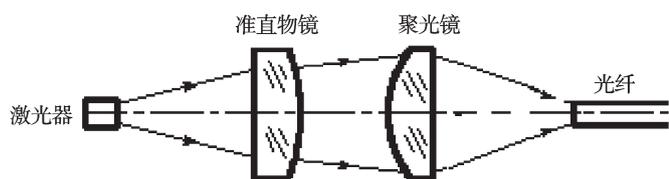


图3 耦合光路设计

激光引信光学系统受结构限制,激光管芯位置安装精度较低,为提高耦合效率,将激光耦合放置在一个六维调整平台上。

二维位移  $X$ 、 $Y$  实现了水平二维调整,上面放置高度位移台,进行  $Z$  方向的调整,  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  都具有非常高的调整精度,以保证聚焦后的光束腰斑落在光纤端面上。转台和水平调整台位于高度位移台上方,通过调节其上的细纹螺杆,实现镜筒的空间角度旋转 ( $\theta_x$ 、 $\theta_y$ 、 $\theta_z$ ),以保证入射激光束和耦合装置以及光纤三者同轴,从而保证光纤耦合效率的最大,调整平台的仿真图如图4所示。

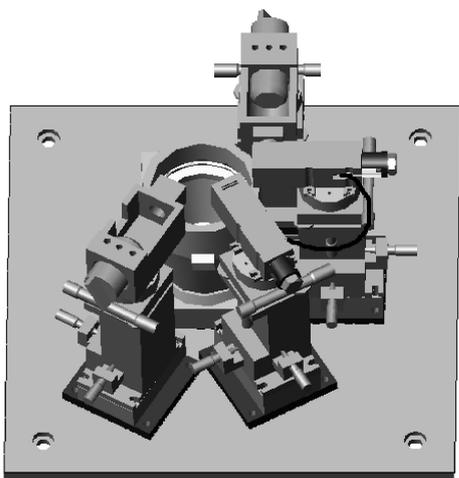


图4 调整平台仿真图

### 2.2.2 衰减设计

整个光路的衰减由衰减器的值、光纤耦合效率、光纤传输损耗、光学器件损耗组成。整个衰减应满足灵敏度测试需要。

光路不带衰减器的传输效率要求高于10%,为实现对调整精度的控制,本研究采用衰减片组合的方式来实现衰减调整,采用单片或多片衰减片调节光强。

### 2.3 控制系统设计

控制系统主要由:示波器、光功率计、信号控制器、步进电机控制器和工控机组成。

工控机通过通讯接口控制步进电机控制器进行产品测试窗口切换。信号测试控制器将需要的测试信号切换到示波器的测试通道,示波器将测试结果返回到工控机。光功率计测试激光信号,将测试结果返回到工控机。工控机采用不同的总线接口与通用设

备通讯:

- (1) RS232接口。用于步进电机运转的通讯接口;
- (2) USB接口。用于将采集到的光功率计读数显示在软件界面上的通讯接口;
- (3) GPIB接口。用于将示波器采集到的信号显示在软件界面上的通讯接口。

测控软件采用虚拟仪器开发平台 LabVIEW 进行设计,并采用基于 NI VISA 的仪器驱动。

VISA 函数可以通用于基于 Ethernet、GPIB、PXI 和串口等多种总线的测试系统,使用者不必再研究各个接口总线特定的 API。作为仪器 I/O 函数库,VISA 编程与传统的 I/O 软件编程基本相同,主要是通过设备的端口读写操作和属性控制,实现与仪器的命令及数据的交换。软件流程如图5所示。

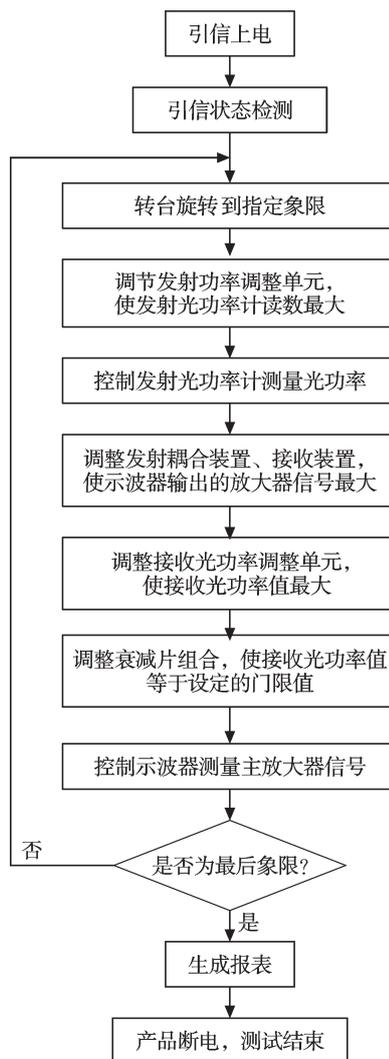


图5 软件流程图

## 3 结果验证

为验证系统的可靠性,本研究对系统测量结果进行了分析,并用设备对经过校准的多个激光引信进行

测试。发射光功率测试结果与真实值之间的差值小于0.025 mW,测量精度达到测试要求。

灵敏度测试结果与真实值之间的差值都小于0.6  $\mu$ W,测试精度达到要求。

接收灵敏度测试时需要进行反复调整,本研究采用Gage R&R测量系统分析法对测试仪器重复性误差和测试者误差进行评估。具体的方法是:不同操作者对同一发产品进行反复测量,和同一操作者对不同的产品进行测量,以此验证测试设备的可靠性和精度。当Gage R&R小于30%,可区分数大于4时,表明测量系统可以接受。

本研究采用分析软件minitab对测试结果进行了测量系统分析,得到的激光引信测试设备接收灵敏度的Gage R&R为16.71%,可区分数为5,表明该系统的测量结果是可信的。

分析得到的Xbar图和R极差图如图6所示。

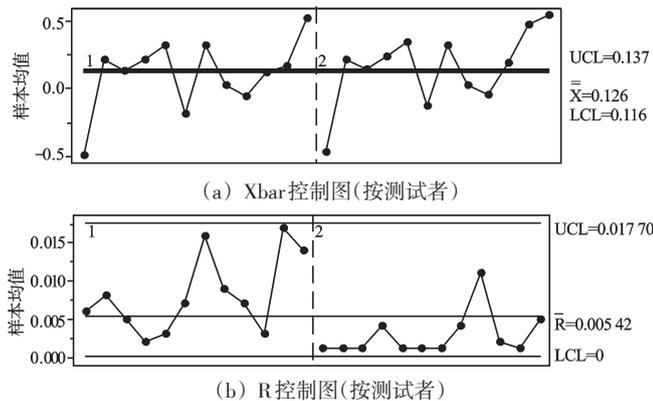


图6 Xbar控制图和R极差图

Xbar图上控制线以外的点表示操作者始终能够区别不同的部件。R极差图表示超出在控制上、下限值为非常规值,通常用这个图了解某些操作者是否比其他人更具有重复性。从图6中可以看出,测量系统能够区分不同的部件,而操作者2比操作者1更具备重复性。

从以上的分析来看,整个系统的测试精度已经达到了设备的技术要求,但也能看出不同的操作者进行

测试时,测试结果存在一定的差异。其主要原因是测试时需要反复调整耦合单元,对操作者的水平和熟练程度有较高要求。

## 4 结束语

本研究提出了基于光纤耦合的激光引信测试设备设计方案。实验结果表明,通过优化的激光耦合设计,采取较小的光学测量平台和较少的测量设备,能够达到较高的光学测量精度。

同时,笔者发现测试设备对操作者的操作水平有较高要求,后续研究中需要加强对操作者的培训,收集和分析测试结果,减少调整环节,改善测试方法,最终将其测试难度降低。

## 参考文献(References):

- [1] 张翼飞,石旭生,邓方林. 弹道导弹激光引信测高算法研究[J]. 制导与引信,2004,25(1):25-29.
- [2] 张亚力,李富荣. 导弹武器纵横谈[M]. 北京:北京长征出版社,1997.
- [3] 孙伟,高春清,魏光辉. 精确CCD光束参数测量与评价系统的设计[J]. 北京理工大学学报,2004,20(4):78-81.
- [4] 袁正,李元级. 现代空空导弹引信技术[J]. 航空兵器,2002(2):11-15.
- [5] 袁正. 激光引信综述[J]. 航空兵器,1998(3):31-38.
- [6] 罗尚文,张红旗. 半导体激光器在激光引信中的应用[C]. 中国宇航学会特种装备专委会第十一次学术交流会论文集,2002:142-143.
- [7] 史春波,马献华. 探测视场对激光引信作用距离影响分析[J]. 红外与激光工程,2007,36(Z1):368-371.
- [8] 张辉,朱永,王涌天. 基于光纤传输的激光引信仿真系统[J]. 红外与激光工程,2003,32(6):556-559.
- [9] 饶云江. 光纤技术[M]. 北京:科学出版社,2006.
- [10] Optical Research Associates. CODEV Reference Manual[Z]. California: Optical Research Associates, California, 1995.
- [11] 杨其民,王崇真. 激光束与光纤耦合的研究[J]. 云南工业大学学报,1995,11(1):1-5.

[编辑:张翔]