

小型大瞬时视场光学探测系统优化设计

张 伟,张 合,张祥金

(南京理工大学 智能弹药技术国防重点学科实验室,江苏 南京 210094)

摘 要: 基于小口径和瞬时大视场激光制导武器平台的要求,提出了一种小型捷联折射式离焦光学探测系统方案。该方案根据捷联式激光半主动目标探测模型和理想离焦光学系统模型得到激光制导理想光学系统参数,并以此参数为基础,使用 ZEMAX 软件进行优化,设计了工作波长为 1 064 nm 的离焦光学探测系统。该系统临界有效探测半视场为 5.89°,临界探测半视场为 13°,长径比为 1.27,较好地解决了整流罩引入的像差问题,并且光斑重心位置与目标位置偏差角存在线性关系。验证实验结果表明该离焦光学探测系统误差小于 0.15°,满足大视场下目标位置偏差角探测的要求。

关键词: 激光制导; 光学设计; 捷联式; 目标位置偏差角

中图分类号: TJ765.3 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201645.0518002

Optimization design of small optical detection system with large instantaneous field of view

Zhang Wei, Zhang He, Zhang Xiangjin

(ZNDY of Ministerial Key Laboratory, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: Based on the requirement of the laser guidance weapon platform with small caliber and large instantaneous field of view, the scheme of a small strapdown defocused refraction optical detection system was proposed. According to the target detection model of strapdown semi-active laser guidance and the ideal defocused optical system model, the optimal system parameters were obtained with the consideration of the application of laser guidance. Based on these parameters, ZEMAX was used to optimize the defocused optical detection system with the work wavelength of 1 064 nm. The critical effective detection half field of view of this system were 5.89 degrees, the critical detection half field of view were 13 degrees, and the length diameter ratio was 1.27. The aberration from the dome was solved well. The linear relationship between spot centroid position and target position deviation angle was presented. The experimental results show that the error of the designed optical defocused detection system is less than 0.15 degrees, meeting the requirement for target position deviation angle detection of large field of view.

Key words: laser guidance; optical design; strapdown; target position deviation angle

收稿日期: 2015-09-05; 修订日期: 2015-10-03

基金项目: 武器装备预先研究项目(51305020104); 中央高校基本科研业务费专项资金(30915011334)

作者简介: 张伟(1989-), 男, 博士生, 主要从事激光探测与激光制导方面的研究。Email: zwnjust@163.com

导师简介: 张合(1957-), 男, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事探测制导与控制方面的研究。Email: hezhang@mail.njust.edu.cn

0 引言

应用于制导领域的激光半主动目标探测体制经过 50 年的发展,经历了各种战场中的检验,具有精度高、抗干扰能力强、结构简单、成本较低的特点,被认为是一种成熟的、精确的制导体制^[1-4]。目前在国内外,激光半主动目标探测体制的应用方兴未艾,在改造常规兵器制导化技术方面,激光半主动目标探测体制是解决未来常规弹药高精度与低成本问题的比较现实的有效途径^[2]。

激光半主动制导技术应用于导弹时,常采用将光学探测系统固联于万向支架上的方式,保证瞬时小视场的高探测精度和大动态视场扫描范围^[2]。激光半主动体制应用于常规弹药时,受小口径的限制,光学探测系统不能采用框架式结构,而应采用捷联式结构,这要求光学探测系统必须具有较大的瞬时探测视场,同时配合较大光敏面的激光四象限探测器(QPD);另一方面,常规火箭弹应用于机动性要求较高的单兵作战时,激光目标指示器体积越小越有利,但激光发射能量同样减少,这要求光学探测系统能够最大程度地收集激光回波能量。魏文俭^[5]等设计了体积较小的折返式光学探测系统,但该系统不能用于大瞬时视场探测,并且只能形成环形光斑,光斑能量利用率较低。胡博设计了由七片透镜组成的激光半主动光学探测系统,结构复杂,系统体积大,不能用于体积受限的常规武器系统^[6]。薛珮瑶等人设计的激光半主动光学探测系统没有考虑整流罩的设计,不能直接用于实际弹药中^[7]。上述文献设计的光学探测系统均没有分析激光半主动制导光学探测系统的参数需求,而且由于大视场下的光学像差并没有完全消除,上述文献也没有分析激光回波经光学系统形成的光斑特点以及光学探测系统的误差特性。为了提高常规火箭弹药激光半主动制导的探测精度和探测概率,从常规火箭弹药体积较小的局限出发,文中研究了捷联式激光半主动制导光学探测技术,提出了一种结构简单的、大瞬时视场、短焦距、折射式的捷联式离焦光学探测系统方案,并分析了激光回波经过该光学系统形成的光斑特性和测量误差。

1 捷联式激光制导目标探测光学模型

1.1 捷联式激光半主动制导目标探测模型

用于常规火箭弹药的捷联式激光半主动制导体

制可以描述如下。地面激光目标指示器照射目标,含有目标方位信息的、经目标反射的激光回波能量被飞行中的常规火箭弹药前端的捷联式光学探测系统(导引头)采集,经过激光信号处理和分析,得到目标位置偏差角度信息,弹上中控系统据此信息执行弹道修正,使弹药飞向目标。这一过程如图 1 所示。捷联式光学探测系统瞬时探测视场有限,需要对其分析以满足弹药的实际需求。

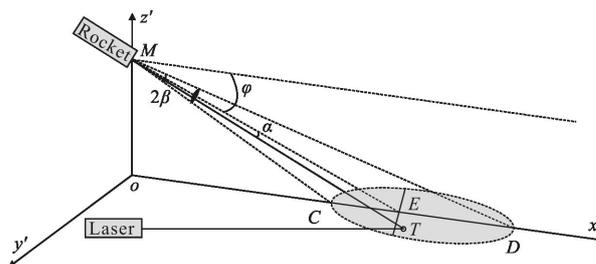


图 1 捷联式激光半主动制导原理示意图

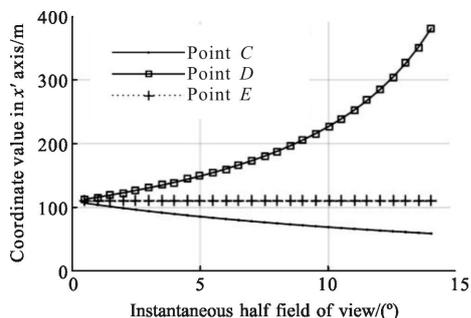
Fig.1 Principle of strapdown semi-active laser guidance

图 1 中,在火箭弹道末段将火箭弹弹轴与铅锤方向所在的平面设置为 $x'oz'$ 平面,得到火箭弹药导引头坐标系 $o-x'y'z'$ 。设 M 点为弹上 QPD 光敏面中心, T 点为在 $x'oy'$ 地面内的目标点。捷联导引头的锥形视场 2β 与地面相交成椭圆区域, ME 为导引头视线, C 为地面近点, D 为地面远点, CD 即为椭圆长轴。 MT 为弹目视线, α 即为目标位置偏差角。 oM 为弹药飞行高度,记作 h 。 φ 为弹轴俯仰角,向上为正。由几何关系得, C 坐标为 $(h \tan(90^\circ + \varphi - \beta), 0, 0)$, D 坐标为 $(h \tan(90^\circ + \varphi + \beta), 0, 0)$ 。椭圆方程为 $ax^2 + by^2 + cx = 1$,椭圆短轴长度为 $2\sqrt{\frac{1}{b} + \frac{c^2}{4ab}}$,经过计算得到三参数如下:

$$\begin{aligned} a &= \frac{\cos(2\varphi) - \cos(2\beta)}{h^2(\cos(2\varphi) + \cos(2\beta))} \\ b &= \frac{-(\cos^2(2\beta) + 1)}{h^2(\cos(2\beta) + \cos(2\varphi))} \\ c &= \frac{\tan(\beta - \varphi) - \tan(\beta + \varphi)}{h} \end{aligned} \quad (1)$$

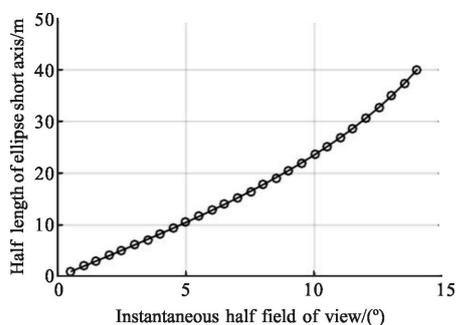
根据常规兵火箭弹仿真弹道数据,某时刻弹药弹道末段高度 40 m,俯仰角为 -20° ,要求能够捕获到 $\{(x', y') | x' = 300, -30 < y' < 30\}$ 范围的目标。此刻弹药锥形视场在地面上形成的椭圆短轴顶点坐标的 y' 分量, C 点、 D 点、 E 点坐标的 x' 分量与导引头半瞬

时视场的变化曲线如图 2 所示。



(a) C 点、D 点、E 点坐标的 x' 分量

(a) x' axis component of point C,D,E



(b) 椭圆短轴顶点坐标的 y' 分量

(b) y' axis component of the top point of ellipse short axis

图 2 地面椭圆区域的参数随导引头半瞬时视场角的变化

Fig.2 Variation of the parameters of the ground ellipse region with the instantaneous half field of view

由图 2 可知,此时刻能够捕获到目标时,导引头的瞬时空视场角需大于 12.5° 。

1.2 捷联式激光制导目标探测光学系统模型

经目标反射的激光能量被常规火箭弹药前端导引头光学系统采集,并被会聚到 QPD 光敏面上,这一过程的示意图如图 3(a)所示。目标看作是一个完全朗伯漫反射物体,目标与火箭弹药的距离远远大于火箭弹药的口径,因此认为经目标反射到达火箭弹药的激光能量是平行的^[8]。对这一过程进行简化建模,采用不产生像差的理想透镜进行分析。

设理想透镜的口径为 D ,理想焦距为 f ,QPD 的半径为 r 。为了获得均匀的光斑,QPD 被放置于焦平面前 Δz 处,QPD 光敏面如图 3(b)所示,激光能量经过聚焦在光敏面上形成的光斑半径为 r_0 ,由几何关系可以得出:

$$r_0 = \frac{D\Delta z}{2f} \quad (2)$$

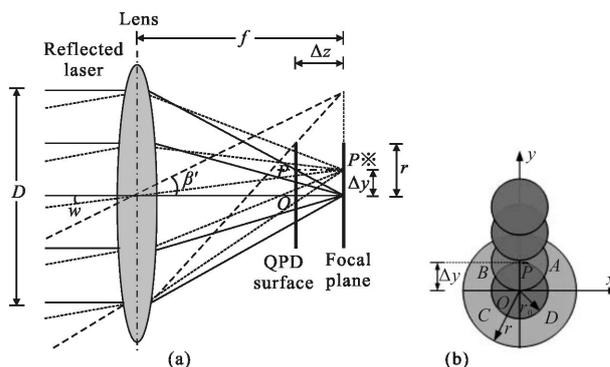


图 3 理想离焦光学系统模型和 QPD 光敏面光斑示意图

Fig.3 Model of ideal defocused optical system and laser spots on QPD surface

当激光回波与光学系统的轴线平行时,光斑中心位置在 O 点,当激光回波与光学系统的轴线存在一定角度 α 时,光斑中心位置将偏离 O 点,光斑中心位置为 $(\Delta x, \Delta y)$,例如图 3(b)中的点 P 。QPD 将光信号转换成电信号,在后续信号处理电路中使用下面的公式计算光斑中心位置的归一化坐标 $(\Delta x, \Delta y)$ ^[9]:

$$\Delta x = \frac{(S_A + S_D) - (S_B + S_C)}{S_A + S_B + S_C + S_D},$$

$$\Delta y = \frac{(S_A + S_B) - (S_C + S_D)}{S_A + S_B + S_C + S_D}, \Delta x, \Delta y \in [-1, 1] \quad (3)$$

式中: $S_i (i=A, B, C, D)$ 表示光斑落在 QPD 光敏面上各个象限中的面积, S_i 与每个象限形成的电信号成正比相关,归一化坐标 $(\Delta x, \Delta y)$ 是由信号处理电路得出的。

激光回波与光学系统轴线之间的偏角,即目标位置偏差角 α_x 和 α_y 可以相应表示为:

$$\alpha_x = \arctan \frac{\Delta x}{f - \Delta z}, \alpha_y = \arctan \frac{\Delta y}{f - \Delta z} \quad (4)$$

考虑到对称性,文中只分析 Y 轴方向上视场变化与光学探测系统的关系。 X 轴方向上的关系用类似的方法也可以得到,其余方向上的关系可以将坐标轴绕 O 点旋转亦可以得到。

当轴外光线(w 为逆时针旋转)的下边界与光敏面上边界相交时,此时光敏面能够探测临界情况下的光能量,在文中称为光学探测系统的临界探测视场。设该视场角为 $2 \times \beta'$,对于该应用场合下的离焦光学探测系统,由图 3(a)中的几何关系得到临界探测半视场表达式:

$$\tan \beta' = \frac{\Delta z D + 2fr}{2f(f - \Delta z)} \quad (5)$$

在光斑充满全部四个象限的情况下,认为探测

有效;同时考虑 QPD 光敏面的最大测量范围,满足的光斑半径 r_0 取值为:

$$r_0 = \frac{r}{2} \quad (6)$$

当轴外光线(w 为逆时针旋转)的上边界与光敏面上边界相交且轴外光线下边界与光敏面下边界相交时,此时光敏面能够探测临界情况下的有效光能量,即探测到目标位置偏差角等于光学探测系统最大有效探测视场。设该临界有效探测视场角为 $2 \times \beta$,有如下几何关系:

$$\tan \beta = \frac{r}{2(f - \Delta z)} \quad (7)$$

此时,公式(4)中目标位置偏差角的取值范围为 $\alpha_x, \alpha_y \in [-\beta, \beta]$ 。

根据公式(2)、(6)、(7),得到光学系统焦距为:

$$f = \frac{rD}{2 \tan \beta (D - r)} \quad (8)$$

根据公式(3)的计算方法,临界探测半视场 β' 与临界有效探测半视场 β 的区别是,目标在 $-\beta \sim \beta$ 视场范围内可以精确计算出回波光斑能量在探测器上坐标位置, $\Delta x, \Delta y < 1$,可以得到精确的目标位置偏差角,适用于激光半主动体制常规火箭弹药的末段精确修正;而目标在 $\beta \sim \beta'$ 和 $-\beta \sim -\beta'$ 视场范围内,光斑不能全部覆盖四个象限,通过计算得到的探测器上坐标位置($\Delta x=1$ 或 $\Delta y=1$)只能表示目标方位偏差的方向,而不能得到精确的值,只能用于粗修正;目标范围大于 $|\beta'|$ 时,光斑不能会聚到探测器光敏面上,不能获得目标位置偏差信息。

1.3 光学探测系统设计参数与设计的要求

由图 2 可知,在满足能够捕获目标情况下,地面远点 D 与导引头视线中心 E 之间距离是地面近点 C 与 E 之间距离的 4 倍,客观上探测精度较低,可以用于粗修正,因此,设置临界探测半视场 $\beta' > 12.5^\circ$ 。

由公式(7),临界有效探测视场角与 QPD 尺寸成正比关系,采用有较大光敏面的 QPD,可获得较大的有效探测视场。文中采用的是上海欧光 QP100 型 QPD,其光敏面直径为 $\phi 10$ mm。由激光回波功率公式^[10]可知,光学系统通光口径越大,导引头能够捕获的目标激光回波能量越多。文中的实际应用场景为常规火箭弹药,体积受限,为了兼顾较大通光口径需求与受限制的光学系统总长,设定通光口径为 $D=30$ mm,光学系统总长 $L < 40$ mm。

光学系统相对孔径(D/f)不宜过大,其数值应小于 1,同时考虑精跟踪视场越大越好的原则, f 的取值又要尽可能小。根据理想光学系统模型,并由公式(7)、(8),得到理想光学系统焦距 $f=28.5$ mm,临界有效探测半视场为 $\beta=6^\circ$,临界探测半视场 $\beta'=17.5^\circ$ 。

2 大视场短焦距离焦光学探测系统设计

常规火箭弹药在飞行的过程中,很大的一部分飞行阻力来自装有激光光学探测系统的弹丸头部,导引头光学系统必须包含整流罩。但是,整流罩是一种非线性元件,对光线产生扩散作用,并产生较大球差和高级像差,影响光线会聚效果。该光学系统要求特殊,并没有现有的光学系统可以作为设计的初始结构。文中使用一片二次非球面平凸透镜对像差进行一定程度的校正。二次非球面由如下公式表示^[11]:

$$Z = \frac{cr}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2r^2}} \quad (9)$$

式中: Z 为沿光轴坐标值; c 为非球面的基准面曲率; r 为镜面的孔径半径; k 为二次系数。

1064 nm 的激光波长处于大气窗口中,是大部分激光半主动制导弹药采用的波段。在文中亦将 1064 nm 作为光学设计的主波长。

根据 1.3 节理想光学系统参数,通过 ZEMAX 软件设计、优化,得到离焦光学探测系统结构图如图 4 所示。

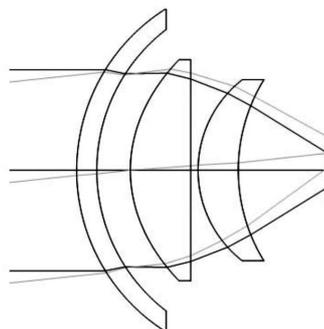
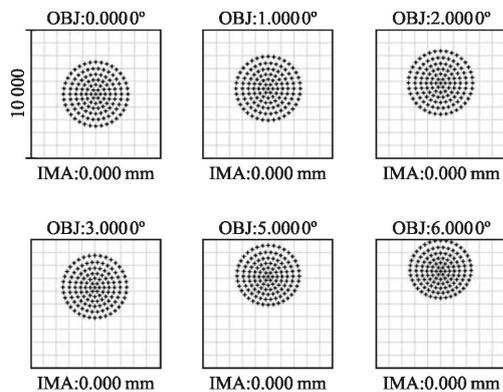


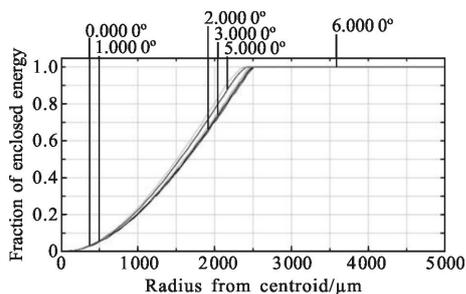
图 4 带整流罩的离焦光学探测系统结构图
Fig.4 Defocused optical system with dome

该离焦光学探测系统一共包含三片镜片。第一片是光学整流罩,镜片两面共球心设计,第二片是采用二次非球面设计的平凸透镜 ($1/c=20.317$ mm, $k=-0.553$),第三片是一枚校正透镜,QPD 光敏面在最

右边,孔径光阑设置在第二片透镜前表面,系统总长为 37.5mm,系统焦距 $f=28.5\text{mm}$,离焦量 $\Delta z=3.65\text{mm}$ 。图中只画出了 0° 视场和 6° 半视场下的光线追迹形态。各个视场在 QPD 光敏面上的光线追迹光斑点列图以及光斑能量包围图分别如图 5(a)、5(b)所示。



(a) 光斑点列图
(a) Spot diagrams



(b) 包围能量曲线
(b) Encircled energy curves

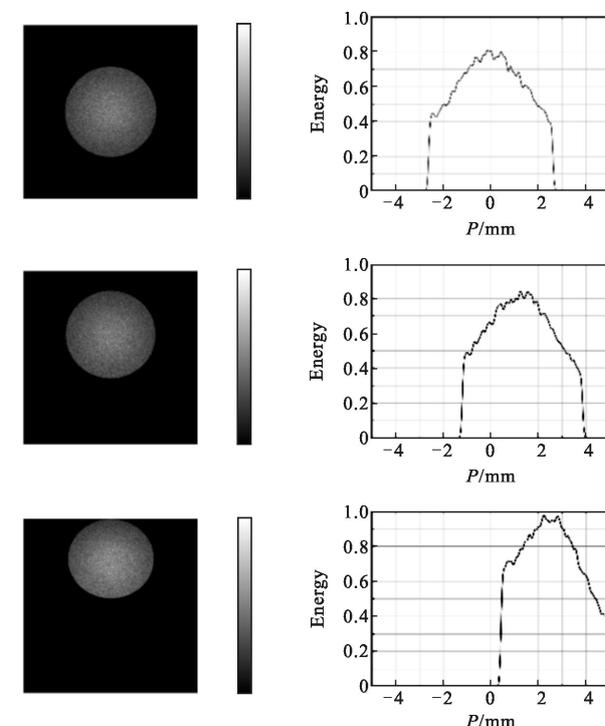
图 5 不同半视场下 QPD 光敏面光斑

Fig.5 Spots on QPD surface with different half field of view angles

图 5 中, 0° 、 1° 、 2° 、 3° 、 5° 、 6° 半视场下, 光斑直径分别为 5、5.03、5.03、5.01、4.90、4.83 mm, 满足设计要求规定的光斑半径 $r_0=2.5\pm 0.2\text{mm}$, 在边缘视场, 光斑直径误差逐渐变大。 6° 半视场附近的光斑上边界已经到达 QPD 光敏面边缘, 因此该离焦光学探测系统的临界有效半视场角 β 约为 6° 。在非序列光学里设置 1 000 000 条追迹光线和一块 $10\text{mm}\times 10\text{mm}$ 的正方形探测器, 经过仿真, 得在 0° 、 3° 、 6° 半视场下光斑在 QPD 光敏面上的位置以及光斑能量分布, 如图 6(a) 所示, 以及 0° 、 3° 、 6° 半视场下光斑在 QPD 光敏面沿 Y 轴能量分布, 如图 6(b) 所示。

由图 6 可见, 各视场下形成的光斑在中心位置

能量最高, 光斑边缘处能量锐减, 形成有效光斑边界, 光斑能量分布集中。对 $0^\circ\sim 6^\circ$ 半视场划分成 31 个区域进行非序列光线追迹, 得到每个视场下光斑重心位置如图 7 所示。



(a) 位置与能量分布灰度图 (b) 沿 Y 轴能量分布图
(a) Location and energy distribution in grey level (b) Energy distribution along Y axis

图 6 0° 、 3° 、 6° 半视场下的 QPD 光敏面表面的光斑

Fig.6 Spots on QPD surface with 0° , 3° , 6° half field of view angle

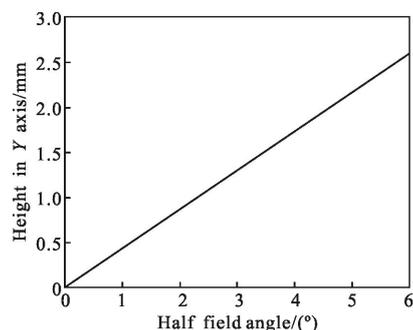


图 7 不同半视场光斑重心位置在 Y 轴上的变化曲线

Fig.7 Barycenters of spots with different half field of view vary along Y axis

经过线性拟合得到此光学探测系统光斑重心位置与目标位置偏差角的关系如下:

$$\alpha_y = \frac{2.5\Delta y + 0.0007}{0.4245} \quad (10)$$

式中的线性拟合标准差是 0.000 57,表明利用线性拟合表达该关系是准确的。在光斑几何半径为 2.5 mm 的前提下,认为当 $\Delta y=1$ 时的视场为光学探测系统的临界有效探测半视场,即 $\beta=5.89^\circ$ 。后续信号处理电路通过公式(4)计算光斑重心在 QPD 中的坐标,再利用公式(10)优化计算 Y 轴方向的目标方位偏差角。由于 QPD 的对称性,X 轴的情况亦然。根据 ZEMAX 光线追迹分析,可得此光学探测系统的临界探测半视场 $\beta'=13^\circ$ 。

3 目标位置偏差角测量实验

在制作了上述离焦光学系统以及后续激光信号处理电路的基础上,搭建模拟实验平台对该光学系统的性能进行测试。实验平台示意图如图 8 所示,由于对称性,该实验只考虑水平方向上光斑移动问题。激光指示信号源采用美国相干公司可调功率 1 064 nm 激光器。激光发射器固定在水平回转平台上,激光发射器以一定的角度发射激光束,指示前方 6 m 处一面直立靶板上激光探测窗口中轴线对准的位置,激光探测窗口接收视场为 0° 的激光回波能量,其中激光探测窗口中轴线对准的位置由安装在激光探测组件上红色激光指示笔确定,标记坐标为(0, y)。

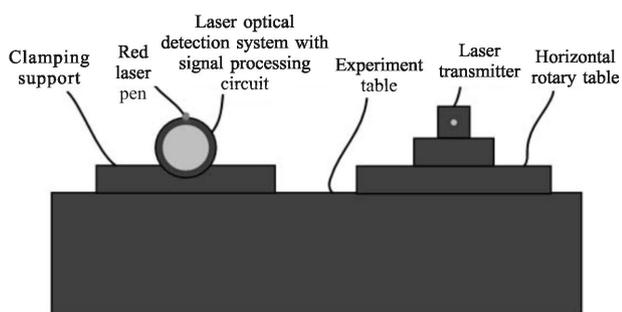


图 8 实验平台

Fig.8 Experimental platform

转动水平回转平台,激光发射器指示目标靶板另一位置(x_t, y),激光探测窗口保持位置不变,则激光探测窗口处的激光回波的角度 $\alpha_{t1}=\arctan(x_t/600)$ 。实验中仅水平转动激光发射器,因此只有目标位置偏差角 α_x 变化。变化不同的 x_t 值,连续测试 10 次,每次测量三组数据。由后续信号处理电路通过公式(10)计算得到的 α_x 与实验设置值 α_{t1} 对比如表 1 所示,测量误差如图 9 所示。

表 1 计算得到的目标方位偏差角与实验设置值对比

Tab.1 Calculated target position deviation angle and the actual value

Deviation angle	$\alpha_x/(^\circ)$	$\alpha_{t1}/(^\circ)$
1	0.02	0
2	0.99	0.95
3	1.98	1.90
4	2.96	2.86
5	4.89	4.76
6	5.89	6.65
7	-1.36	-1.43
8	-4.20	-4.29
9	-5.08	-5.23
10	-5.89	-6.18

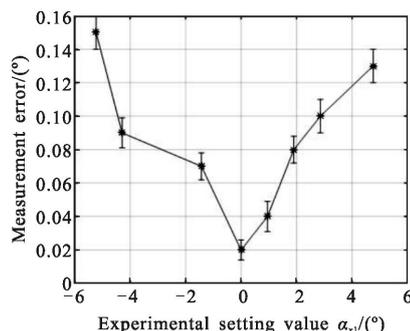


图 9 实验设置值与测量误差的关系以及测量误差误差线

Fig.9 Relationship between experimental settings and measurement errors and the error bars of measurement errors

第 6 组和第 10 组实验实际的目标位置偏差角超过了激光光学探测系统的临界有效视场,数据只能用于粗修正。通过其余各组数据可以看出该离焦光学探测系统的测量误差随着目标回波偏差角增大而增大,最大仅为 0.15° 。该离焦光学探测系统的测量值与实验实际值大致吻合,并且比设计要求中规定的最大测量误差小 0.35° ,因此可以有效探测目标位置偏差角,满足设计要求。

4 结论

文中建立并分析了捷联式激光半主动目标方位探测模型,建立了理想离焦光学探测系统模型,提出

了一种大视场短焦距的离焦光学探测系统方案。通过对该光学探测系统模型的分析,使用 ZEMAX 软件优化设计了临界有效探测视场为 $2 \times 5.89^\circ$, 临界探测视场为 $2 \times 13^\circ$, 焦距 28.5 mm, 系统总长为 38 mm 的离焦光学探测系统。经过仿真解决了大瞬时视场目标位置偏差角计算的问题,得到光斑位置-偏差角度的线性关系,并具有较高的测量灵敏度。通过实验表明文中设计的离焦光学探测系统的测量误差小于 0.15° , 经过误差校正能够达到在常规火箭弹药上使用的要求。文中的分析、优化设计结果可以为目前常规火箭弹药的激光制导化改造以及新型小型化捷联式激光制导系统设计提供参考。

参考文献:

- [1] Zhang Tengfei, Zhang Hexin, Hui Junjun, et al. A review on development and application of laser-guided weapons [J]. *Electronics Optics & Control*, 2015, 22(10): 62-67. (in Chinese)
张腾飞, 张合新, 惠俊军, 等. 激光制导武器发展及应用概述[J]. 电光与控制, 2015, 22(10): 62-67.
- [2] Wang Kuangbiao. Latest development and trends of semi-active laser guidance technology [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(5): 275-279. (in Chinese)
王狂飙. 激光半主动制导技术的新发展[J]. 红外与激光工程, 2008, 37(5): 275-279.
- [3] Bao Haige. Development of the laser semi-active homing guidance weapons[J]. *Ship Electronic Engineering*, 2010, 30(5): 21-25. (in Chinese)
鲍海阁. 国外激光半主动寻的制导武器的发展[J]. 舰船电子工程, 2010, 30(5): 21-25.
- [4] Gao Siyuan, Liu Hui, Zhu Mingchao, et al. Analysis and optimization of angle measurement accuracy of strap-down laser semi-active guidance seeker [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(7): 2169-2174. (in Chinese)
高思远, 刘慧, 朱明超, 等. 捷联激光制导寻的器测角精度分析与优化[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(7): 2169-2174.
- [5] Wei Wenjian, Qin Shiqiao, Zhang Baodong, et al. Design on the optical system of laser semi-active seeking guided hardware-in-the-loop simulation seeker [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(2): 322-325. (in Chinese)
魏文俭, 秦石乔, 张宝东, 等. 激光半主动半实物仿真导引头光学系统的设计 [J]. 红外与激光工程, 2008, 37(2): 322-325.
- [6] Hu Bo, Chang Weijun, Sun Ting, et al. Laser semi-active seeking guided seeker optical system [J]. *Journal of Applied Optics*, 2012, 33(2): 402-405. (in Chinese)
胡博, 常伟军, 孙婷, 等. 激光半主动制导寻引头光学系统的设计[J]. 应用光学, 2012, 33(2): 402-405.
- [7] Xue Peiyao, Wu Yao, Feng Qian, et al. Design of the large field optical system for four-quadrant detecting [J]. *Chinese Optics*, 2014, 7(3): 462-468. (in Chinese)
薛珮瑶, 吴耀, 冯茜, 等. 大视场四象限探测光学系统设计 [J]. 中国光学, 2014, 7(3): 462-468.
- [8] Lazo M M, Zarko P B. Optimization of Optical Receiver Parameters for Pulsed Laser-Tracking Systems [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2009, 58(3): 681-690.
- [9] Zhao Xin, Tong Shoufeng, Jiang Huilin, et al. Experimental testing on characteristics of four-quadrant detector [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, 18(10): 2164-2170. (in Chinese)
赵馨, 佟首峰, 姜会林, 等. 四象限探测器的特性测试[J]. 光学精密工程, 2010, 18(10): 2164-2170.
- [10] Fang Yanchao, Wang Jianjun, Yu Guoquan, et al. Laser signal generating method in internal field simulation experiment [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(6): 1766-1772. (in Chinese)
方艳超, 王建军, 于国权, 等. 内场仿真试验中激光指示信号生成方法[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(6): 1766-1772.
- [11] Gan Lin, Zhang He, Zhang Xiangjin. New optical large field receiving technology in laser fuze[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, 42(12): 1514-1518. (in Chinese)
甘霖, 张合, 张祥金. 激光引信新型光学大视场接收技术研究[J]. 光子学报, 2013, 42(12): 1514-1518.