

激光半主动制导中光斑对四象限探测器 定位精度影响分析

仲启媛, 刘 峰, 曹纹诚, 冯梦豪
(火箭军工程大学, 陕西 西安 710025)

摘 要: 针对激光半主动制导中, 光斑的实际位置、大小及能量分布等因素影响探测器定位精度的问题, 基于四象限探测器的光斑位置检测原理, 建立了探测器检测位置与光斑实际位置的关系模型, 在控制背景光为定值的条件下, 通过弹目距离的变化改变光斑半径, 仿真了激光传输距离和导引头光学系统焦距与定位误差之间的关系。仿真结果表明: 激光远场传输条件下距离变化所引起的定位误差变化缓慢; 在弹目距离一定时, 短焦条件下焦距变化所引起的定位误差小于长焦条件下的焦距变化, 且短焦条件下光斑的误差更容易控制在允许范围内。

关键词: 激光半主动制导; 四象限探测器; 高斯光斑; 定位精度

中图分类号: TJ410

文献标志码: A

文章编号: 2097-2741(2024)04-061-007

Analysis of the Influence of Spots on Positioning Accuracy of Four-quadrant Detector in the Laser Semi-active Guidance

ZHONG Qiyuan, LIU Feng, CAO Wencheng, FENG Menghao

(Rocket Force University of Engineering, Xi'an 710025, Shaanxi)

ABSTRACT: To solve the problem that in laser semi-active guidance, the positioning accuracy of the detector is affected by the actual position, the size and the energy distribution of the spot, a relationship model about the detecting position of the detector and the actual position of the spot was established based on the principle of four-quadrant detector spot position detection. Under the condition of controlled constant background light, the relationship between laser transmission distance, focal length of the guidance head's optical system, and positioning error was simulated with various spot radius changed by missile-target distances. Simulation results revealed that under laser far-field transmission conditions, changes in distance result in gradual variations in positioning error. When the missile-target distance is fixed, focal length variations cause smaller positioning errors under short-focus conditions compared to long-focus conditions. Furthermore, under short-focus conditions, it is easier to control the spot error within the allowable range.

KEYWORDS: laser semi-active guidance; four-quadrant detector; Gaussian spot; positioning accuracy

收稿日期: 2023-05-24

第一作者: 仲启媛 (1973—), 女, 副教授, 主要从事定位定向与光电防护研究。E-mail: zhongqiyuan1225@163.com

引用格式: 仲启媛, 刘峰, 曹纹诚, 等. 激光半主动制导中光斑对四象限探测器定位精度影响分析[J]. 火箭军工程大学学报, 2024, 38(4): 61-67.

激光半主动制导是利用位于弹体外的激光目标指示器照射被打击目标, 激光经目标漫反射后进入导弹导引头, 经过导引头光学系统成像后形成光斑, 落在四象限探测器上, 经过信号处理, 完成对目标的探测和定位。探测器的探测精度直接影响导引头对目标的定位精度。

在激光半主动制导系统中, 影响四象限探测器定位精度的因素很多。目前, 国内外针对提高激光半主动制导精度开展了大量研究。张辉等^[1]研究发现, 在保证检测范围的条件下, 采用较小半径的光斑、选取靠近光敏面中心的工作区域和提高系统信噪比可以提高目标位置检测精度; 蒲小琴等^[2]设计了在 $\pm 15^\circ$ 视场角中线性视场可达 $\pm 8^\circ$ 的导引头光学系统。秦立存等^[3]通过改进简单高斯算法, 提高了四象限探测器对激光光斑中心定位的精度, 改进高斯算法的均方根误差比传统高斯算法减小了 60.4%。

本文基于四象限探测器的工作原理, 从光斑实际位置、光斑大小和导引头参数等影响因素入手, 分析光斑对四象限探测器探测精度的影响, 建立探测器输出位置与光斑实际位置的关系模型, 在简单高斯定位模型下对光斑位置检测误差的影响进行数值仿真, 并分析导引头焦距和激光传播距离的相互影响下对定位精度影响的特点。

1 四象限探测器工作原理

四象限探测器是基于象限分解法设计的一种光电探测器, 每个象限由一个独立的探测器构成, 通过 4 个象限输出的光电流值对光斑中心位置进行定位。将四象限探测器置于导引头光学系统中稍偏离焦平面的位置, 目标反射的激光经导引头光学系统成像在四象限探测器的光敏面上, 形成圆形的目标光斑。当信号激光偏离光轴, 目标光斑不在光轴方向上时, 光斑落在 4 个象限的面积不同, 每个象限的光敏面接收到的光能不同, 输出不同大小的光电流信号。根据 4 个象限上光斑的能量分布可计算出目标光斑的中心位置, 从而对目标进行空间定位, 如图 1 所示。

假设 4 个象限 A、B、C、D 接收到的光能分别为 E_A 、 E_B 、 E_C 、 E_D , 产生的光电流为 I_A 、 I_B 、 I_C 、 I_D , 有如下公式^[4]:

$$I_i = KE_i, i = A, B, C, D \quad (1)$$

式中: K 为四象限探测器的灵敏度, 其参数由探测

器本身决定。

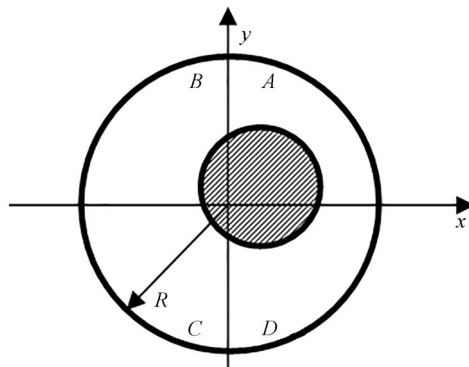


图 1 四象限探测器工作原理

Fig. 1 Working principle diagram of four-quadrant detector

当目标位置发生改变时, 光路也会改变, 导致光斑在光敏面上的位置改变, 此时可以通过 4 个象限的电流值来判断光斑的质心位置。光斑质心位置 $(\hat{X}, \hat{Y})$ 的表达式为

$$\hat{X} = \frac{E_A + E_D - (E_B + E_C)}{E_A + E_B + E_C + E_D} = \frac{I_A + I_D - (I_B + I_C)}{I_A + I_B + I_C + I_D} \quad (2)$$

$$\hat{Y} = \frac{E_A + E_B - (E_C + E_D)}{E_A + E_B + E_C + E_D} = \frac{I_A + I_B - (I_C + I_D)}{I_A + I_B + I_C + I_D} \quad (3)$$

落在光敏面上的激光光斑能量分布并不均匀, 激光在谐振腔内每次被反射镜反射, 在腔镜边缘会产生衍射损耗。故在激光光束截面上, 边缘部分的光强必将比中心部分弱。故激光束不是均匀光束, 而是高斯光束。

2 高斯光斑能量分布模型

本文以高斯光斑进行分析。高斯辐照度分布以光束中心为轴对称, 并且随着光束中心与传播方向垂直距离的增加而减小, 如图 2 所示。图中: θ 为激光远场发散角; ω_0 为光束束腰半径, $\omega_0 = \frac{\lambda}{\pi\theta}$; λ 为光束波长。

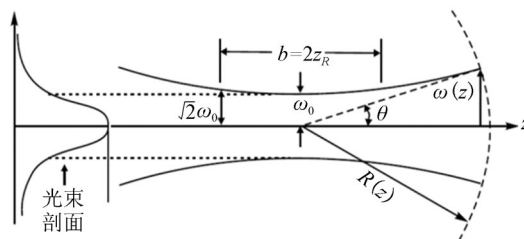


图 2 高斯光束剖面模型

Fig. 2 Section diagram of Gaussian light beam

高斯能量分布的光斑半径定义为位置光功率 $1/e^2$ 处的半径, 因此高斯能量分布的光斑实际半径要大于定义半径^[5]。

高斯光束通过激光器的扩束系统向 z 轴方向传输, 传输方向光场空间内光强分布为

$$E(x, y) = \frac{2p}{\pi\omega^2} \cdot \exp\left(-2\frac{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2}{\omega^2}\right) \quad (4)$$

式中: p 为光束总功率; ω 为传播距离 z 时辐照度 $1/e^2$ (13.5%) 处高斯光束的半径。

高斯光束经空间传播后通过导引头光学系统成像在焦平面上的光斑大小为

$$\omega = f\omega_0 \sqrt{1 + \left(\frac{\lambda z_1}{\pi\omega_0^2}\right)^2} / z_2 \quad (5)$$

式中: z_1 为激光传输距离; z_2 为目标到导引头光学系统的距离; ω_0 为束腰半径; f 为焦距。

故而, 束腰半径 ω_0 越小, 光斑发散越快; 束腰半径 ω_0 越大, 光斑发散越慢。

图 3 为束腰半径 ω_0 为 1 mm, 波长 λ 为 1 064 nm 时的典型高斯光束强度归一化分布情况^[6]。

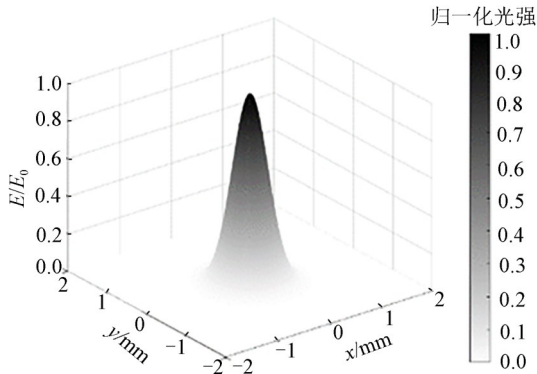


图 3 高斯光束强度归一化分布

Fig. 3 Intensity normalization of Gaussian beam

对于一个激光器来说, 光束的束腰半径 ω_0 处的激光光斑质量最好, 能量最集中稳定。但束腰半径存在于激光谐振腔内, 当激光射出谐振腔后其光束就会呈现扩束状态。

通常所说的激光准直性好只是相对的, 在长距离传播过程中, 仍要考虑激光传输距离对光束扩散的影响。

3 基于高斯光斑模型的定位建模

在使用四象限探测器对激光光斑进行定位检测时, 核心问题是如何根据探测器产生的光电流解算出激光光斑的实际位置。当任意性质的激光束成像在探测器上形成光斑时, 象限内产生的光电流可表示为

$$I_i = K \iint_{s_i} E(x, y) ds_i, \quad i = A, B, C, D$$

式中: s_i 为光斑面积。

在高斯光束假设下, 当高斯光斑入射到四象限探测器光敏面上时, 若探测器光敏面的半径为 R , 忽略探测器暗区宽度影响, 4 个象限内产生的光电流分别为

$$\begin{cases} I_A = K \int_0^R \int_0^R E(x, y) dx dy \\ I_B = K \int_0^R \int_{-R}^0 E(x, y) dx dy \\ I_C = K \int_{-\sqrt{R^2-x^2}}^0 \int_{-R}^0 E(x, y) dx dy \\ I_D = K \int_{-\sqrt{R^2-x^2}}^0 \int_0^R E(x, y) dx dy \end{cases} \quad (6)$$

将式 (6) 代入式 (2)、(3), 得到光斑质心位置 $(\hat{X}, \hat{Y})$ 为

$$\hat{X} = \frac{2(E_A + E_D)}{E_A + E_B + E_C + E_D} - 1 = \frac{2 \int_{-\sqrt{R^2-x^2}}^0 \int_0^R E(x, y) dx dy}{\int_{-\sqrt{R^2-x^2}}^0 \int_0^R E(x, y) dx dy + \int_{-\sqrt{R^2-x^2}}^0 \int_{-R}^0 E(x, y) dx dy} - 1 \quad (7)$$

$$\hat{Y} = \frac{2(E_A + E_B)}{E_A + E_B + E_C + E_D} - 1 = \frac{2 \int_0^R \int_{-R}^0 E(x, y) dx dy}{\int_{-\sqrt{R^2-x^2}}^0 \int_0^R E(x, y) dx dy + \int_{-\sqrt{R^2-x^2}}^0 \int_{-R}^0 E(x, y) dx dy} - 1 \quad (8)$$

从式 (7) 和式 (8) 可以看出, 根据检测到的光斑质心位置 $(\hat{X}, \hat{Y})$ 与光斑实际中心位置 (x_0, y_0) 之间的双重积分关系, 无法解出光斑实际

中心位置。

从高斯光斑模型的特性可知, 光斑能量主要集中在光斑中心位置, 光斑边缘的能量较弱。由

高斯光斑半径 ω 定义可知, 86.5%以上的能量都存在于半径为 ω 的圆内。因此, 可近似认为光斑的能量都分布在探测器的光敏面上, 光敏面外的能量可忽略不计。因此, 将式(6)中以光敏面的边缘为积分上下限, 近似为无穷, 可得

$$\begin{cases} I_A = K \int_0^{+\infty} \int_0^{+\infty} E(x, y) dx dy \\ I_B = K \int_0^{+\infty} \int_{-\infty}^0 E(x, y) dx dy \\ I_C = K \int_{-\infty}^0 \int_{-\infty}^0 E(x, y) dx dy \\ I_D = K \int_{-\infty}^0 \int_0^{+\infty} E(x, y) dx dy \end{cases} \quad (9)$$

则式(7)、(8)可改写为

$$\hat{X} = \frac{2 \int_{-\infty}^{+\infty} \int_0^{+\infty} E(x, y) dx dy}{\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} E(x, y) dx dy} - 1 \quad (10)$$

$$\hat{Y} = \frac{2 \int_0^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} E(x, y) dx dy}{\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} E(x, y) dx dy} - 1 \quad (11)$$

将式(4)分别代入式(10)、(11), 可得^[7]

$$\hat{X} = \frac{4}{\pi \omega^2} \int_{-\infty}^{+\infty} \exp\left(-2 \frac{(y-y_0)^2}{\omega^2}\right) dy \cdot \int_0^{+\infty} \exp\left(-2 \frac{(x-x_0)^2}{\omega^2}\right) dx \quad (12)$$

$$\hat{Y} = \frac{4}{\pi \omega^2} \int_0^{+\infty} \exp\left(-2 \frac{(y-y_0)^2}{\omega^2}\right) dy \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} \exp\left(-2 \frac{(x-x_0)^2}{\omega^2}\right) dx \quad (13)$$

定义 Δ_x 、 Δ_y 为光斑质心位置 $(\hat{X}, \hat{Y})$ 在 x 轴和 y 轴方向偏离光斑实际中心位置 (x_0, y_0) 的偏移量, 则

$$\Delta_x = \hat{X} - x_0 = \frac{4}{\pi \omega^2} \int_{-\infty}^{+\infty} \exp\left(-2 \frac{(y-y_0)^2}{\omega^2}\right) dy \cdot \int_0^{+\infty} \exp\left(-2 \frac{(x-x_0)^2}{\omega^2}\right) dx - x_0 \quad (14)$$

$$\Delta_y = \hat{Y} - y_0 = \frac{4}{\pi \omega^2} \int_0^{+\infty} \exp\left(-2 \frac{(y-y_0)^2}{\omega^2}\right) dy \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} \exp\left(-2 \frac{(x-x_0)^2}{\omega^2}\right) dx - y_0 \quad (15)$$

4 仿真分析

以激光半主动制导炸弹为例, 经过大气传输扩散后的激光光束照射到导引头光学系统, 经聚焦后照射到探测器光敏面上。通常, 导引头光学

系统的接收透镜通光孔径 $\varphi = 30$ mm, 探测器光敏面半径 $R = 5$ mm, 接收视场为 $\pm 15^\circ$ 。根据四象限探测器的检测特性可知, 当光斑半径 r 位于 $[3/8R, 5/8R]$ 区间内时, 四象限探测器具有良好的动态范围和探测灵敏度^[8]。取光斑半径最大值 $r_{\max} = 3.125$ mm时, 成像光斑必须全部落在光敏面上, 则光斑中心最大偏离距离 $h_{\max} = 1.875$ mm, 即为光斑中心位置允许的最大偏移量。根据导引头光学系统工作原理有公式 $h = f \tan \omega$, 可得光学系统的焦距 f 最大不超过21.43 mm, 且光学系统焦距的确定最终会直接影响光斑的聚焦程度, 光斑不能过大也不能过小。最终确定探测器光学系统的主要参数为: 通光孔径 $\varphi = 30$ mm, 接收视场为 $\pm 15^\circ$, 系统焦距为20.43 mm。根据简单光学系统设计仿真可得激光传输距离与探测器上接收到的光斑大小之间的关系曲线如图4所示。

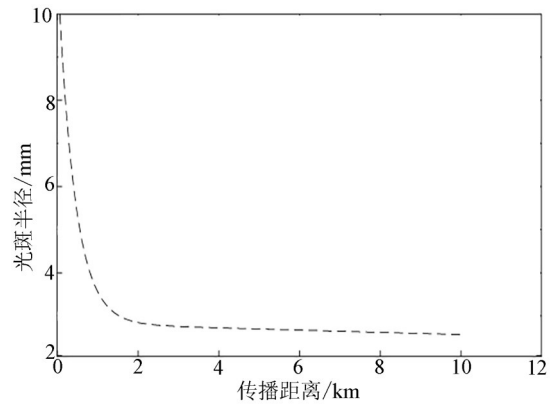


图 4 光斑半径随弹目距离变化曲线

Fig. 4 Variation curves of spot radius along with missile-target distance

当设定导引头的制导工作距离为100~5 000 m, 激光波长 $\lambda = 1064$ nm时, 在上述光斑特性条件下, 通过MATLAB仿真来定量分析光斑实际中心位置 (x_0, y_0) 、光斑半径 ω 、光斑光强对探测器误差的影响, 得出实际误差数据。选择传输距离 z 为3 000 m, 当光束束腰半径 $\omega_0 = 0.8$ mm时, 激光经扩散传输后在3 000 m处的光束半径 $\omega = 2.76$ mm。

当设定导引头的制导工作距离为100~5 000 m时, 从图4可以看出: 目标刚进入导引头的制导工作区间时, 光斑变化非常缓慢, 随着离目标越来越近, 光斑直径变化剧烈; 在制导区间末端时, 光斑急剧增大, 从而覆盖整个光敏面, 导致探测器失真, 此时导引头进入截断距离而无法工作^[9]。

4.1 光斑中心位置对光斑位置检测误差的影响

在光斑半径 ω 和光斑能量一定时, 入射在四象限探测器光敏面上高斯光斑的定位精度随光斑位置的变化而变化。当探测器半径 $R=5\text{ mm}$ 、光斑半径 r 的取值范围为 $[1.875, 3.125]\text{ mm}$ 时, 探测器具有良好的探测灵敏度。

图5给出了光斑中心位置 (x_0, y_0) 在以半径为 1.875 mm 的圆范围内变化时的误差仿真曲线。

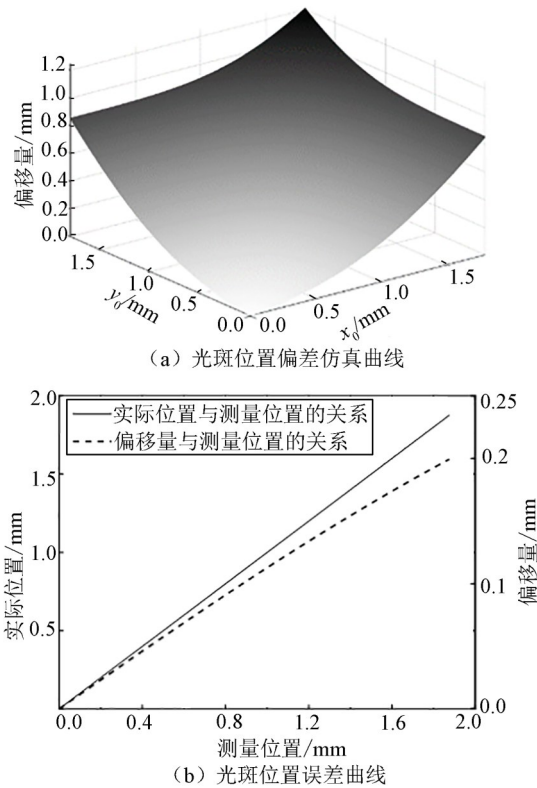


图5 光斑中心位置 (x_0, y_0) 对检测误差影响仿真曲线
Fig. 5 Simulation curves of influence of spot central positions (x_0, y_0) on detecting errors

可以看出: 光斑实际中心偏离探测器中心的值越大, 偏移量 Δ 越大, 定位检测精度就越低; 当光斑质心与四象限探测器中心 $(0, 0)$ 重合时, 偏差为0; 将光斑中心 (x_0, y_0) 从 $(0, 0)$ 移动到 $(0, 1.875)\text{ mm}$ 时, 光斑定位最大偏差为 0.199 mm , 最大偏差百分比为 10.63% 。

4.2 光斑半径对光斑位置检测误差的影响

在光斑实际中心 (x_0, y_0) 和光束传输距离 z 一定时, 入射在探测器光敏面上高斯光斑的定位精度随光斑半径 ω 的变化而变化。假设光斑实际中心 (x_0, y_0) 为 $(1, 1)\text{ mm}$, 光束传输距离 z 为 $1000\sim 5000\text{ m}$ 时, 激光经导引头光学系统后光斑半径 ω 的变化范围为 $(0.5, 3.5)\text{ mm}$ 。图6分别为光斑质

心位置解算值与光斑实际中心的偏移量 Δ 和方差 σ^2 的仿真曲线。

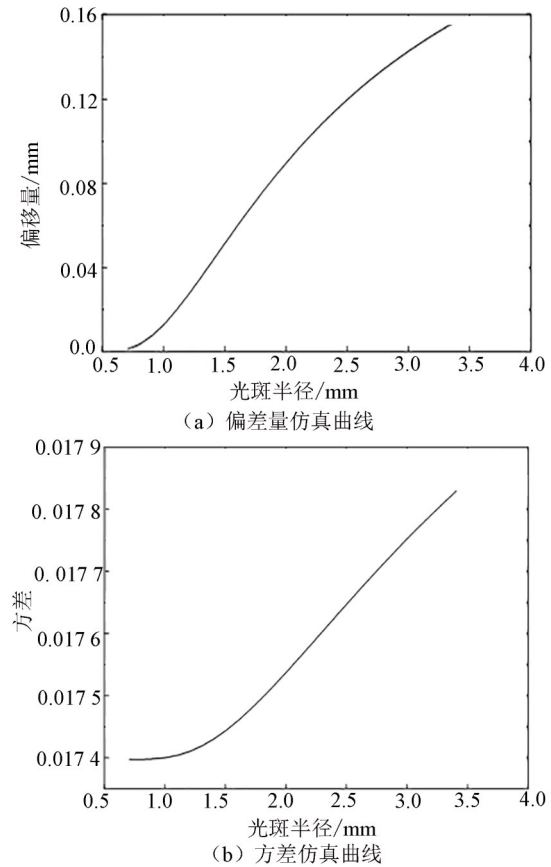


图6 光斑半径对检测误差影响仿真曲线

Fig. 6 Simulation curves of influence of spot radius on detecting errors

从图6可以看出, 光斑半径 ω 越大, 偏差量 Δ 越大, 探测器的定位检测精度就越低, 且给定光斑半径范围内最小偏差量为 0.012 mm , 最大偏差量为 0.160 mm , 最大误差百分比为 4.59% 。这是因为高斯光斑半径 ω 越大, 高斯光斑能量越不集中, 能量梯度越趋于平缓, 导致定位检测精度下降。且光斑半径 ω 所引起的误差比光斑位置所引起的误差高了约1倍。

一般情况下, 为提高定位检测精度, 可以减小光斑半径, 即减小透镜组与探测器之间的距离 f 以提高光斑聚焦程度, 但是透镜组与探测器之间的距离 f 不能一直减小。这是因为光斑半径直接影响检测范围, 光斑半径越小, 系统的检测范围也就越小, 透镜组与探测器之间的距离 f 会影响光学系统的参数设置, 并且会影响球差、慧差和畸变, 从而引起光斑的质量。所以根据实际情况, 综合考虑光学系统的参数设置来确定大小适中的光斑。

4.3 光斑光强对光斑位置检测误差的影响

从前面分析可知, 光斑的检测定位误差与传输距离和光学系统的参数有关, 因此, 确定激光传输距离和光学系统焦距为主要变量。假定光斑中心位置 (x_0, y_0) 为 $(1, 1)$ mm, 背景光强度干扰固定时, 图 7 给出了传播距离 z 及光学系统焦距 f 对定位精度的影响。

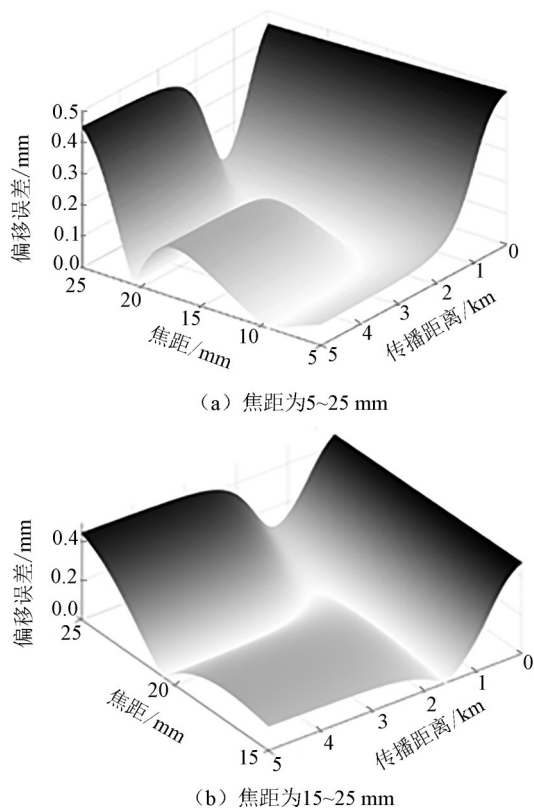


图 7 激光传输距离和光学系统焦距对检测误差影响仿真曲线

Fig. 7 Simulation curves of influence of laser transmission distance and focal length of optical system

从图 7 (a) 可以看出, 光斑的定位精度随着导引头光学系统和激光传播距离动态性地变化。激光的传输距离大于 2 000 m 时, 光斑的定位精度趋于平缓; 而当激光传输距离小于 1 000 m 时, 光斑定位精度随着传播距离的减小而急剧增大, 此时无法对光斑进行有效定位。这是因为激光传输距离达到百米量级时, 随着离目标越来越近, 光斑直径变化剧烈, 在制导区间末端时, 从而覆盖整个光敏面, 导致探测器失真。

而导引头光学系统的焦距为 9.47~20.66 mm 时, 光斑的定位精度最小。但受探测器探测阈值的限制, 光斑半径不可能无限小, 显然, 导引头光学系统的焦距过小会导致光斑的半径过小, 可

能会小于探测器的检测阈值而无法对光斑进行有效检测, 所以, 将光学系统的焦距范围调整为 $(15, 25)$ mm。此时, 由图 7 (b) 可以得出, 当激光传播距离一定时, 光学系统焦距为 20.66 mm 时, 光斑定位精度最好。所以, 当考虑设计冗余和制造误差偏差时, 尽量将焦距控制在小于 20.66 mm; 当激光焦距一定时, 激光传播距离为 2 000 m 处光斑定位精度最好, 且最小偏移量为 0.01 mm。

5 结论

本文基于四象限探测器的测量原理, 从理论上分析了光斑对探测器定位精度的影响, 主要得到以下结论。

(1) 当探测器光敏面半径 $R = 5$ mm, 光斑半径 r 为 $(1.875, 3.125)$ mm 时, 探测器具有良好的探测灵敏度, 且光斑中心允许的最大偏离距离为 1.875 mm, 光斑定位最大偏差为 0.199 3 mm。

(2) 光斑实际中心为 $(1, 1)$ mm 时, 光斑半径的变化范围为 $(0.5, 3.5)$ mm 最大偏差量为 0.160 5 mm。当设定和使用导引头时, 导引头制导距离应尽量大于光斑定位精度最小处所对应的探测距离, 光学系统焦距设定略小于光斑定位精度最小处所对应的焦距。

参考文献:

- [1] 张辉, 陈云善, 耿天文, 等. 四象限探测器位置检测精度的主要影响因素研究[J]. 中国激光, 2015, 42(12): 306-314.
ZHANG H, CHEN Y S, GENG T W, et al. Study on main factors affecting position detection accuracy of four-quadrant detector[J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(12): 306-314.
- [2] 蒲小琴, 董全林, 余子箫, 等. 半主动激光导引头光学系统设计及线性度分析[J]. 航天器环境工程, 2020, 37(3): 303-309.
PU X Q, DONG Q L, YU Z X, et al. Design of optical system for semi-active laser seeker and related linearity analysis[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2020, 37(3): 303-309.
- [3] 秦立存, 贺伟. 基于四象限探测器的激光光斑中心定位算法[J]. 应用激光, 2021, 41(3): 561-568.
QIN L C, HE W. Laser spot center location algorithm based on four-quadrant detector[J]. Applied Laser, 2021, 41(3): 561-568.
- [4] 尚韬, 李曦, 刘增基, 等. 新型四象限设计及其光斑

- 参数测量方法[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(4): 1034-1040.
- SHANG T, LI X, LIU Z J, et al. Novel four-quadrant design and the method for obtaining spot parameters[J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(4): 1034-1040.
- [5] 李鑫鹏. 基于四象限探测器的宽范围高精度光斑位置检测系统研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2022: 15.
- LI X P. Research on wide range and high precision spot position detection system based on four quadrant detector[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2022: 15.
- [6] 邴昱凯. 高动态激光能量和光斑大小模拟技术研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2011: 13-20.
- BING Y K. The simulation technology of high dynamic laser energy and spot size[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2011: 13-20.
- [7] 张乃元. 基于四象限探测器的高精度光束偏转角度测量方法研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2021: 15.
- ZHANG N Y. High precision angle measurement of beam deflection with four-quadrant detector[D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2021: 15.
- [8] 杜亚雯, 董全林, 蒲小琴, 等. 激光半主动导引头光学系统设计与分析[J]. 激光与红外, 2018, 48(12): 1536-1540.
- DU Y W, DONG Q L, PU X Q, et al. Analysis and design of optical system of laser semi-active seeker[J]. Laser & Infrared, 2018, 48(12): 1536-1540.
- [9] 梁巍巍, 张文攀, 李慧, 等. 激光制导武器干扰半实物仿真系统激光光斑研究[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(2): 155-159.
- LIANG W W, ZHANG W P, LI H, et al. Study of laser spot in hardware-in-the-loop simulation system for guided weapon jamming[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(2): 155-159.