

文章编号:1002-2082(2012)02-0402-04

激光半主动制导导引头光学系统的设计

胡 博,常伟军,孙 婷,何玉兰

(西安应用光学研究所,陕西 西安 710065)

摘要:根据四象限探测器的工作原理,激光半主动导引头光学系统所成光斑需均匀分布在探测器靶面上。首先分析此类光学系统像差特点,提出像差的设计方案,然后通过使用 CODE V 设计一套光学系统,利用痕迹图、包围能量等定性评价系统光斑质量。在不同视场时,通过 LightTools 光机分析软件追迹 1×10^6 根光线,得到探测器靶面的光线分布,利用 Matlab 处理数据并绘制角度-输出响应曲线,利用该曲线可精确评价探测器靶面的光斑性能。

关键词:激光导引头;光学系统设计;四象限探测器;激光半主动寻的制导

中图分类号:TN249; TJ765.3

文献标志码:A

doi:10.5768/JAO201233.0207001

Laser semi-active seeking guided seeker optical system

HU Bo, CHANG Wei-Jun, SUN Ting, HE Yu-Lan

(Xi'an Institute of Applied Optics, Xi'an 710065, China)

Abstract: According to principles of quadrant detector, light spots of laser semi-active seeking guided seeker optical systems should be formed on the target surface of quadrant detector uniformly. This paper firstly analyzed the aberration characteristics of these optical systems and presented a method for correcting the aberrations, then designed an optical system by CODE V, evaluated the spots quality of the optical system qualitatively by the footprint and the encircled energy. 1×10^6 rays were traced by LightTools to obtain the distribute of the rays on the quadrant detector for various fields of view. The target angle-output response curve which could evaluate the performance of light spots precisely was plotted by Matlab. The article provides reference for the optical system design of laser semi-active seeking guided seeker.

Key words: laser seeker; optical system design; quadrant detector; laser semi-active seeking guidance

引言

激光半主动寻的制导武器(LSSGWS)具有制导精度高、抗干扰能力强、结构简单、成本低、使用方便等优点,因而被广泛应用于武器装备中^[1-2]。激光半主动寻的制导武器核心器件是激光导引头,导引头由位于前端的光学系统收集激光反射的回波,利用四象限探测器作为光电探测器件进行制导。通常情况下,目标信号经光学系统后在四象限探测器靶面上形成一定大小的光斑,通过分析光斑覆盖在探测器4个不同区域的面积来判断目标的方位。

在激光半主动寻的制导中,根据分布在探测器不同象限的光斑能量进行信号处理,并且要求光斑尽量分布均匀,以提高探测精度^[3-4]。然而,由于光学系统均存在一定的像差,会导致光斑能量分布不均匀,所以需分析影响光斑均匀性的因素,在光学设计时进行像差设计,减小对光斑的影响。

根据激光半主动寻的制导中四象限探测器目标方位探测的工作原理,对目标信号经过光学系统产生的光斑提出要求,结合像差对光斑能量分布的影响,利用 CODE V 进行系统设计。然后提出评价设计结果的方法,对激光半主动寻的制导

光学系统的设计具有一定的参考作用。

1 探测原理及对光学系统的要求

1.1 四象限探测器原理

四象限探测器的原理如图 1 所示。目标反射的激光信号通过导弹前端的光学系统在四象限 PIN 芯片形成一个激光光斑。

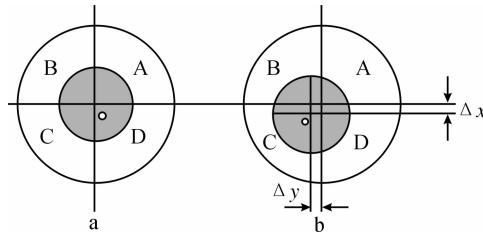


图 1 四象限探测器原理

Fig. 1 Principle of quadrant detector

若激光光斑正好落在象限探测器的中心,如图 1(a)。那么, A、B、C、D 4 个象限探测器输出的信号经 4 路放大器放大后的输出 V_A 、 V_B 、 V_C 、 V_D 的幅值应完全相等,这说明导弹正好对准了目标^[5]。此时有:

$$(V_A + V_B) - (V_C + V_D) = 0 \quad (1)$$

$$(V_A + V_D) - (V_B + V_C) = 0 \quad (2)$$

若导弹未对准目标,在四象限光敏面上形成的光斑将不在中心,如图 1(b)。此时, $(V_A + V_B) - (V_C + V_D) \neq 0$, 说明导弹上下位置有偏差, 此时会输出一个误差信号去控制导弹垂直尾舵, 以改变它的上下状态, 使导弹调整对准目标。同理, 当 $(V_A + V_D) - (V_B + V_C) \neq 0$ 时, 说明导弹左右有偏差, 此时会输出一个误差信号去控制导弹水平尾舵, 以改变它的左右状态。利用四象限输出信号的幅值变化, 可以有效地控制导弹不断地自动修正其飞行方向, 直到准确地飞向被攻击的目标。

1.2 对光学系统光斑的要求

导引头工作时, 利用分布在四象限探测器上光斑能量的中心来确定目标的方位。根据现有资料, 一般情况下光斑的大小约为探测器靶面的 $1/2$ ^[6]。当光斑的中心坐标为 $O'x, y$ 时, 如图 1(b) 所示, 能判断出目标的方位和俯仰角:

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{x}{f} \right) \quad (3)$$

$$\beta = \tan^{-1} \left(\frac{y}{f} \right) \quad (4)$$

式中: α 、 β 分别为目标的水平偏角和俯仰偏角; f 为光学系统焦距。

如果光学系统存在像差, 将会影响光斑的能量分布, 导致分布不均匀, 从而改变光斑能量的中心位置, 影响激光半主动寻的制导目标方位探测的精度。故激光半主动寻的制导中导引头要求光学系统光斑分布均匀^[7]。

2 像差分析及校正方案

激光半主动寻的制导光学系统属于非成像系统, 依照光斑能量分布处理信号, 但是光学系统像差会引起光斑能量分布不均匀, 引起探测误差。为提高光斑的均匀性, 研制中需进行像差设计。在激光半主动寻的制导中, 激光制导武器的激光目标指示器光源多数采用一定波长的激光器, 且在接收光学系统中都加有窄带滤波片。所以, 对于激光制导武器光学系统的像差分析只需考虑其单色像差, 包括球差、彗差、像散、场曲和畸变^[8]。

在以上 5 种像差中, 只有球差属于轴上点像差, 描述轴上点源发出的同心光束由于入射高度不同使其相交与光轴的不同位置, 相对理想像点有不同程度的偏离。球差具有轴对称性, 而且球差只是改变弥散斑半径的大小, 不会影响光束分布的对称性。其他 4 种像差分别描述轴外点光线的分布特点, 其中, 彗差描述轴外物点光束经过光学系统成像后失去对称性的严重程度^[9]。彗差越大, 轴外点光束经光学系统的成像越不对称, 将降低光斑分布均匀性。轴外点的像差场曲和像散, 由于其引起像平面的弯曲而容易使弥散斑成像失去对称性, 从而降低光斑的均匀性。畸变的产生将改变轴外物点在理想像平面的成像位置, 在一定程度上也将对光斑均匀性产生影响。

在光学系统设计时, 不能单纯使用成像系统的优化方法。因为在优化时, 光学设计软件自动优化功能是以寻找最小的光学弥散斑为目标, 而不会考虑能量分布是否均匀。在设计时, 需要人为地控制各种像差, 对球差之外的其他非对称像差需要校正, 减小对光线对称性的影响。同时, 根据光学系统特点, 设计过程中需要控制球差的量值, 并且引入离焦量, 保证最终光斑的大小, 满足探测器的要求^[10]。

3 光学系统设计及评价

3.1 光学系统指标

光学系统设计指标为

- a) 波长:1 064 nm;
- b) 接收透镜通光口径: $\Phi 30$ mm;
- c) 接收视场 $2\omega: \pm 10^\circ$;
- d) 探测器: $\Phi 10$

3.2 设计结果及评价

根据光学指标,利用 CODE V 设计出一套光学系统,如图 2 所示。具体的光学参数为:入瞳 D 为 30 mm, F 数为 0.54, 光斑直径是 $\Phi 5$ mm ± 0.1 mm, 总长度小于 50 mm。

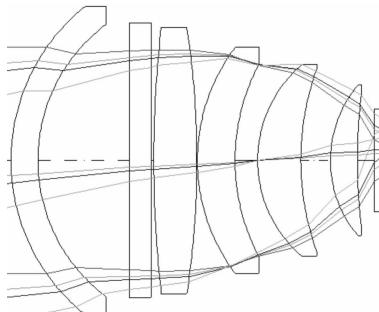


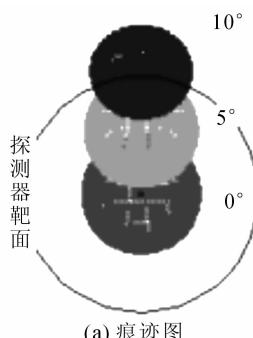
图 2 光学系统外形图

Fig. 2 Optical system

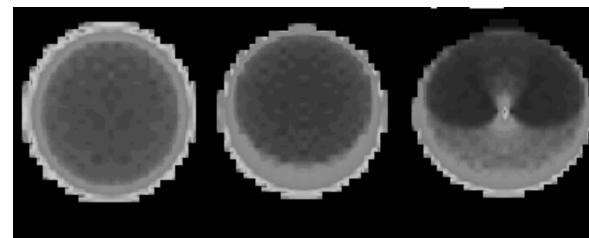
3.2.1 光斑痕迹图和照度分布图

痕迹图用于描述不同视场光斑在探测器靶面的位置,同时也显示出光斑的口径,利用 CODE V 中的痕迹图功能得到该系统在 $0^\circ, \pm 5^\circ, \pm 10^\circ$ 时光斑的位置分布图,如图 3(a)所示,从下往上分别代表 $0^\circ, \pm 5^\circ, \pm 10^\circ$ 的光斑,其中光斑的口径满足 $\Phi 5$ mm ± 0.1 mm 要求。

利用 CODE V 中的 Lumspot 宏,分析不同视场光斑照度分布情况,得出不同视场光斑的相对照度分布,如图 3(b)所示。通过该图可以定性得出能量的相对分布情况,用于指导系统的快速优化改进。



(a) 痕迹图



(b) 照度分布

图 3 不同视场的痕迹图和照度分布

Fig. 3 Footprint and energy distribute of different FOVs

3.2.2 包围能量分布曲线

包围能量分布曲线用于描述光斑能量随着半径的分布情况,假定光斑的能量分布均匀,则有:

$$E = \rho \times \pi \times r^2 \quad (5)$$

式中: ρ 为能量密度。 ρ 和 π 为定值,令 $k = \rho \times \pi$,于是有:

$$E = kr^2 \quad (6)$$

由(6)式可得出能量 E 和光斑半径 r 成抛物线关系。

利用 CODE V 能够得到光斑能量随着半径变化的分布曲线,如图 4 所示,其中横轴为光斑直径,纵轴为能量百分比。通过该图可以判断能量的相对分布情况,也可快速地指导系统的优化。

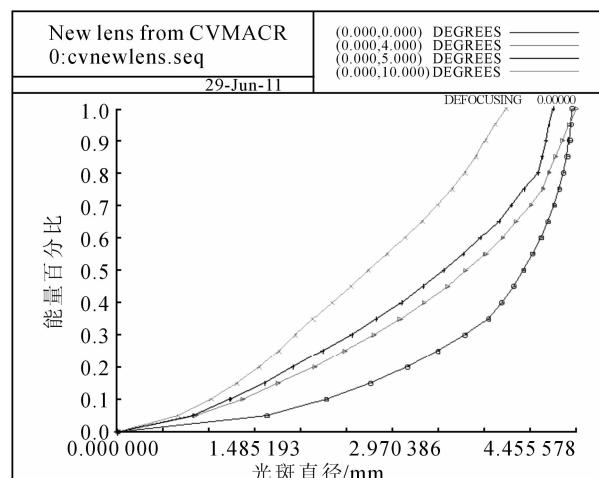


图 4 包围能量曲线

Fig. 4 Encircled energy curve

3.2.3 精确度分析

当光斑分布不均匀时,光斑中心位置将产生偏移,影响到探测精度。根据四象限探测器工作原理,利用 LightTools 在不同视场各追迹 1×10^6 根光线,一根光线代表独立的能量分布,不同视场得到一组分布在探测器不同象限的光线数量。利

用公式(1)和公式(2)以及探测器工作原理可计算出不同视场时的输出响应,理想情况下目标信号角度变化和输出响应成线性关系。

利用 Matlab 将目标角度和输出数据进行拟合,绘制目标角度($0^\circ \sim 5^\circ$)和输出响应曲线,如图 5 所示。光斑的大小和光线分布详细数据显示,该结果可满足导引头使用。利用此方法可计算出不同视场时数据点偏差值,准确评价光学系统的探测精度。

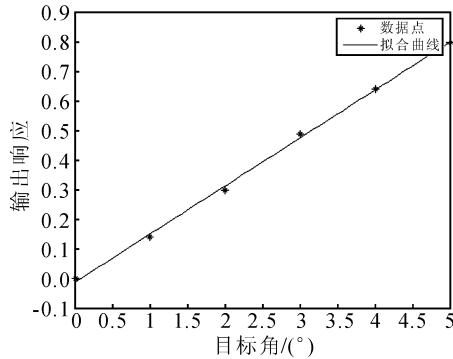


图 5 目标角度-输出数据曲线

Fig. 5 Target angle versus output data

4 结论

根据激光半主动寻的制导中四象限探测器工作原理,对光学系统设计时的像差进行分析,并提出像差校正方案。然后设计一套光学系统,评价探测器靶面处的光斑质量,利用痕迹图和包围能量曲线可定性判断光学系统光斑的质量。然后在不同视场时追迹 1×10^6 根光线,根据具体数据分析能量分布对探测精度的影响,最终的设计数据满足导引头光学系统的使用。

参考文献:

- [1] 施德恒,熊水英. 激光半主动寻的制导导弹发展综述[J]. 红外技术,2000,22(5):28-34.
SHI De-heng, XIONG Shui-ying. The summarizer of laser semi-active seeking guided missiles'development [J]. Infrared Technology, 2000, 22 (5): 28-34. (in Chinese with an English abstract)
- [2] 王狂飙. 激光制导武器的现状、关键技术与发展[J]. 红外与激光工程, 2007, 36(5):651-656.
WANG Kuang-biao. Status quo, key technology and development of laser guided weapon[J]. Infrared and Laser Engineering, 2007, 36(5):651-656. (in Chinese with an English abstract)
- [3] 刘宁, 柴金华. 四象限光电探测器在激光光学系统中的典型应用分析[J]. 光机电信息, 2009, 26 (1): 43-49.
LIU Ning, CHAI Jin-hua. Analysis of applications of quadrant photodetectors to modern optical systems [J]. OME Inforamtions , 2009, 26(1):43-49. (in Chinese with an English abstract)
- [4] 崔子浩, 付石友. 基于 905 nm 激光器的激光跟踪系统研究[J]. 激光与红外, 2010, 40(9):950-953.
CUI Zi-hao, FU Shi-you. Research on laser tracking system based on 905 nm laser[J]. Laser&Infrared, 2010, 40 (9): 950-953. (in Chinese with an English abstract)
- [5] 谭千里. 四象限探测器组件在激光制导技术中的应用[J]. 半导体光电, 2005, 26(2) : 155-157.
TAN Qian-li. The application of quadrant photodetector module on laser guidance technology[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2005, 26(2):155-157. (in Chinese with an English abstract)
- [6] 徐代升. 四象限探测系统信号光斑的优化设计[J]. 湖南理工学院学报, 2007(1):50-53.
XU Dai-sheng . Optimal design for signal light spot of detecting systems with quadrant detectors [J]. Journal of Hunan Institute of Science and Technology, 2007(1):50-53. (in Chinese with an English abstract)
- [7] 余峰, 何烨, 李松, 等. 四象限光电检测系统的定位算法研究及改进[J]. 应用光学, 2008, 29 (4): 493-497.
YU Feng, HE Ye, LI Song. Improvement of positioning algorithm for fourquadrant optoelectronic detection system[J]. Journal of Applied Optics, 2008, 29 (4):493-497. (in Chinese with an English abstract)
- [8] 魏文俭, 秦石乔. 像差对激光制导目标方位探测精度的影响[J]. 光学技术, 2007, 33(S1):142-146.
WEI Wen-jian, QIN Shi-qiao. Influence of optical system aberration on precision of detecting target position in laser semi-active seeking guidance[J]. Optical Technique, 2007, 33 (S1): 142-146. (in Chinese with an English abstract)
- [9] 王之江. 光学设计理论基础[M]. 北京: 科学出版社, 1985.
WANG Zhi-jiang. Theoretical foundation of optical design [M]. Beijing: Science Press, 1985. (in Chinese)
- [10] SANYAL S. Optics for laser seeker[C]//ICOP 2009-International Conference on optics and Photonics. India; Chandigarh, 2009.