

激光半主动导引头光学系统设计与分析

杜亚雯^{1,2}, 董全林^{1,2}, 蒲小琴^{1,2}, 刘丽国³, 张春熹¹

(1. 北京航空航天大学仪器科学与光电工程学院 北京 100191;

2. 国家“惯性技术”重点实验室 北京 100191; 3. 93790 部队 石家庄 050000)

摘要:激光半主动导引头作为一种精确制导的方式,已经在实战中得到广泛的应用。导引头通过对探测器上获取的激光信号进行数据处理以获取目标的位置信息,因此导引头获取激光光斑的能力将会直接影响导引头跟踪目标的性能。本文基于单四象限探测器的工作原理,根据导引头的设计指标,对光学系统的焦距及获取光斑的大小进行分析,应用 ZEMAX 软件对光学系统进行设计和优化。并从光斑大小、系统畸变和光斑能量分布均匀性等角度对光学系统的性能进行评价。根据评价结果可知该光学系统满足设计要求,获取的光斑质量较好。

关键词:激光半主动导引头;光学系统设计;光斑质量

中图分类号:TN249 文献标识码:A DOI:10.3969/j.issn.1001-5078.2018.12.016

Analysis and design of optical system of laser semi-active seeker

DU Ya-wen^{1,2}, DONG Quan-lin^{1,2}, PU XIAO-qin^{1,2}, LIU Li-guo³, Zhang Chun-xi¹

(1. School of Instrumentation Science and Opto-electronics Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China;

2. Science and Technology on Inertial Laboratory, Beijing 100191, China;

3. Unit 93790 of PLA, Shijiazhuang 050000, China;)

Abstract: As a select of precision guidance, laser semi-active seeker has been widely used in the war today. By analyzing the energy of laser, the seeker can get the location of the target. Thus, the character of laser's spot that receive by the seeker will influence its ability of tracking the target directly. According to the design specifications and the working principle of the single four-quadrant detector, the main parameters of the optical system is analyze in the paper. After this, the optical system is designed and optimized by ZEMAX. For comprehensive evaluation of optical system performance, the spot size and aberration are analyzed. The analysis shows that the optical system meets the design requirements and the quality of the obtained spot is better.

Key words: laser semi-active seeker; optical system design; spot quality

1 引言

从20世纪末几次世界局部战争中,可以发现,激光制导技术在战场中发挥着重要作用。激光制导武器首次应用是在1972年,美国在越南战争中使用的第一代“宝路石 I”型制导炸弹,在中东战争、海湾

战争中美国也多次使用“宝路石 II”激光制导炸弹。在战争中,激光制导武器表现出较高的命中率^[1-2]。此外,和其他制导武器相比,激光制导武器具有结构简单和成本低的优点,这使得此后各国陆续展开激光制导技术的研究。激光制导技术分为激光主动制

作者简介:杜亚雯(1994-),女,硕士研究生,主要研究方向为激光导引头,惯性导航与制导,智能阀门定位器。

E-mail: duyawen@buaa.edu.cn

通讯作者:董全林(1964-),男,教授,博士生导师,主要从事超显微仪器技术,惯性导航与制导的研究工作。

E-mail: dongquanlin@buaa.edu.cn

收稿日期:2018-05-05

导和激光半主动制导两种制导方式。目前,激光半主动导引头的技术已比较成熟^[3-4]。在激光半主动导引头的工作过程中,光学系统的主要作用是接收和汇聚由目标反射的激光。控制系统对四象限探测器获得的光斑能量数据进行分析处理,判断出目标的角度和位置信息^[5]。因此,激光半主动导引头光学系统的性能将会直接影响到导引头的作用距离、作用精度等重要指标。

本文通过分析光学系统工作的基本原理,根据设计指标,得出光学系统相关参数,并应用 ZEMAX 进行光学系统的设计和优化。该光学系统满足性能指标要求,可以为其他激光半主动导引武器光学系统设计提供一定的参考。

2 四象限探测器工作原理

2.1 探测器工作原理

四象限探测器是由四个性能相同的光敏面组成,其示意图如图 1 所示。当导引头接收到目标反射的激光时,在四象限探测器上形成光斑,通过对各个象限输出信号进行和差运算,可以得到目标的位置偏差信息^[6]。

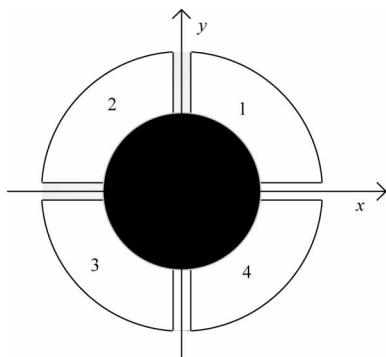


图 1 单四象限探测器示意图

Fig. 1 Illustration of the single four quadrant detector

当光学系统的光轴和目标之间没有位置偏差时,光斑中心与单四象限探测器的中心重合,此时,探测器四个象限的输出电流信号大小相等,经过和差运算之后,没有误差信号。

当光学系统的光轴和目标之前存在位置偏差时,光斑的中心与单四象限探测器的中心将存在一定的偏差。此时,设光斑中心位置坐标为 (X, Y) ,各象限输出电流信号大小分别为 U_1 、 U_2 、 U_3 、 U_4 ,根据和差运算,有:

$$U_x = K_x [(U_1 + U_4) - (U_2 + U_3)] / \sum U \quad (1)$$

$$U_y = K_y [(U_1 + U_2) - (U_3 + U_4)] / \sum U \quad (2)$$

式中, $\sum U = U_1 + U_2 + U_3 + U_4$, K_x 和 K_y 为比例系数; U_x 、 U_y 为 x 、 y 方向上的偏差电压信号。

根据式(1)和式(2),进一步进行分析和公式推导,可得式(3)和式(4):

$$U_x = 2K_x \left[\frac{x}{r} \sqrt{1 - \left(\frac{x}{r}\right)^2} + \arcsin\left(\frac{x}{r}\right) \right] / \pi \quad (3)$$

$$U_y = 2K_y \left[\frac{y}{r} \sqrt{1 - \left(\frac{y}{r}\right)^2} + \arcsin\left(\frac{y}{r}\right) \right] / \pi \quad (4)$$

式中, r 为接收光斑的半径; x 、 y 为光斑中心位置坐标。由两式可知,偏差电压信号的大小不仅和光斑的位置相关,也和光斑的半径有一定的关系。

2.2 获取光斑半径分析

假设四象限探测器半径为 R ,考虑不同光斑半径下的导引头工作过程。若光斑太大,当 $r \geq R$ 时,光斑会覆盖整个探测器,此时,通过单四象限的输出信号进行和差处理,根据公式,得到 $U_x = U_y = 0$,系统无法判断目标方位;若光斑太小,当光斑半径 r 和分划线宽度 $2a$ 之间满足关系: $r \leq \sqrt{2}a$ 时,将会出现无法探测到光斑信号的情况,此时导引头也将无法确定目标位置信息^[7]。为了避免出现误判的情况,提高导引头判断目标方位的能力,需要对光斑半径和偏差电压信号之间的关系进行分析,并将光斑的大小作为检验光学系统性能的一个重要指标。

根据光学系统性能指标,首先对光斑半径和探测器半径之间的关系进行探索。根据四象限探测器偏差电压输出计算公式,利用 MATLAB 进行仿真,得出不同光斑大小、位置时偏差电压信号归一化幅度曲线,如图 2 所示。

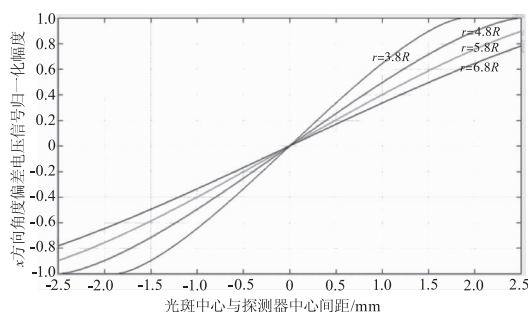


图 2 偏差电压信号归一化曲线

Fig. 2 The normalization curve of the deviation voltage signal

根据图2可以看出当光斑半径 r 位于 $[\frac{3}{8}R, \frac{5}{8}R]$ 区间内时,四象限探测器具有较好的动态范围和探测灵敏度。

3 光学系统设计

3.1 光学系统指标

光学系统设计指标为:

- 工作波段: $(1064 \pm 2.5) \text{ nm}$;
- 接收透镜通光口径: $\phi = 32 \text{ mm}$;
- 接收视场 $2\omega: \pm 15^\circ \pm 0.5^\circ$, 线性区不小于 $\pm 5^\circ$;
- 探测器直径: $D = 10 \text{ mm}$ 。

3.2 光学系统指标分析

根据对成像光斑半径的分析并参考探测器直径,可知在本光学系统中,需设计获取光斑半径 r 的取值范围为 $[1.875 \text{ mm}, 3.125 \text{ mm}]$ 。

根据要求, $\pm 5^\circ$ 视场范围为线性区间、对探测器半径 $R = 5 \text{ mm}$,取光斑半径最大值 $r = 3.125 \text{ mm}$,可得 5° 视场方向成像光斑的中心位置(即主光线在光敏面上的成像位置)必须落在半径为 R_3 的圆形区域内,并满足:

$$R_3 < R - r \quad (5)$$

即 5° 视场主光线的像高 $y < 1.875 \text{ mm}$ 。

图3为探测器光敏面获取光斑成像示意图, O_1 为圆心。

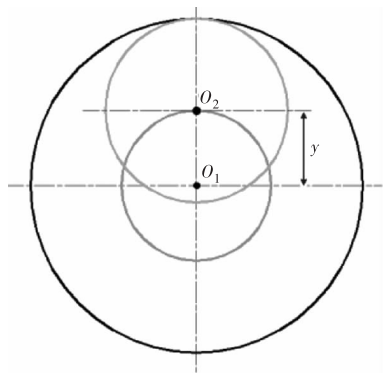


图3 边缘视场主光线成像区域示意图

Fig. 3 Illustration of the chief ray imaging area of the edge field of view

为满足线性区的要求, 5° 视场下的成像光斑中心最远位置为 O_2 ,此时,该视场下获取的光斑边缘刚好在探测器上。因此,必须将 5° 视场下光斑中心位置落在以 O_1 为圆心, O_1O_2 为半径的圆内才能满足要求。取 5° 视场下,光斑半径最大值,此时,通过计算可得, $O_1O_2 = 1.875 \text{ mm}$ 。根据光学系统焦距和

像高关系式:

$$y = f \times \tan \omega \quad (6)$$

得出,系统焦距 f 必须控制在 21.43 mm 以内。

由以上计算和分析可知,要设计的光学系统的焦距在 21.43 mm 内,入瞳直径为 32 mm ,视场角为 $\pm 15^\circ$,线性区为 $\pm 5^\circ$ 。利用ZEMAX进行光学系统设计和优化,通过控制球差大小控制获得的光斑,通过控制像差控制光斑能量的均匀性^[8]。最终得到光学系统如图4所示。该光学系统的主要参数为:入瞳直径为 32 mm ,系统焦距为 20.43 mm ,光斑半径为 2.559 mm ,系统总长为 31.77 mm ,接收视场角为 $\pm 15^\circ$ 。光学系统相关参数,满足设计指标要求。

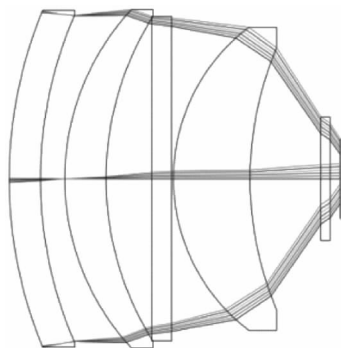


图4 光学系统图

Fig. 4 Optical system diagram

4 光学系统性能分析

激光半主动导引头通过对光斑在单四象限探测器上的能量分布进行分析处理获得目标的位置信息,光学系统的成像质量,对导引头的性能有较大的影响,因此需要对该光学系统获取的光斑质量进行分析。由于激光半主动导引头的光学系统不是成像系统而是离焦系统,且系统使用激光光源,因此不存在色差。又考虑到光学系统球差是轴对称性像差,对光斑能量的均匀性没有影响。综合考虑以上因素,对光学系统性能的评价从光斑大小、系统畸变、点列图、包围能量图等角度进行^[9]。

图5是通过ZEMAX得到的光学系统在不同视场下的光斑点列图。点列图反应了不同视场下的光斑大小和能量分布的均匀性。图中所示为线性视场内 0° 、 1° 、 2° 、 3° 、 4° 、 5° 视场下的光斑点列图。根据该点列图可以看出,在线性区内的不同视场下,光斑形状为均匀的圆形,且光线分布比较均匀,光斑半径大小均在 $2.5 \sim 2.6 \text{ mm}$,满足四象限探测器和光学系统对光斑半径的设计要求。

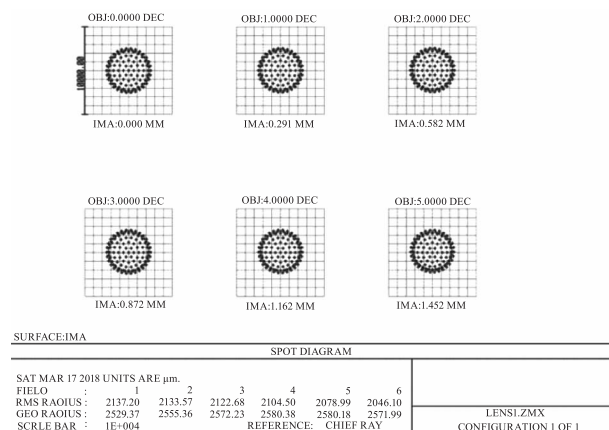


图5 光斑点列图

Fig. 5 Light spot map

图6为 0° 、 2° 、 5° 视场下的光斑痕迹图。通过光斑痕迹图我们可以看出在不同视场下光斑距离像面中心位置。根据图6中的数据可知,在 y 方向上, 5° 视场下的光斑中心位置最高为 $y_{\max} = 1.4634 \text{ mm} < 1.875 \text{ mm}$,此时光斑半径 $r = 2.559 \text{ mm}$,整个圆形光斑分布在探测器上,满足线性区 $\pm 5^\circ$ 的设计要求。

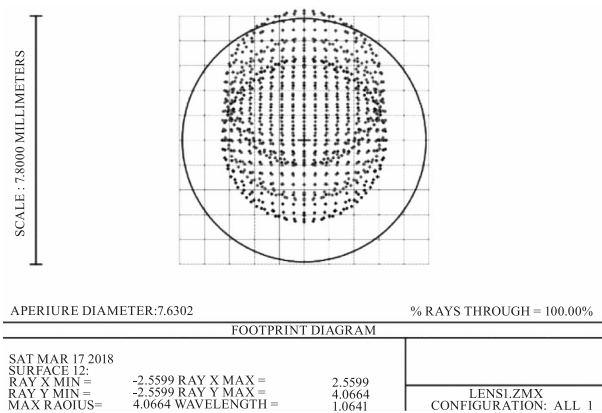


图6 光斑痕迹图

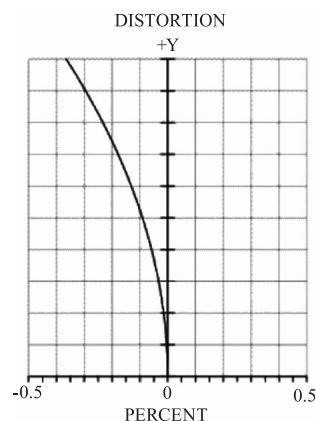
Fig. 6 The trace of light spots

在获取相高 y 值和已知焦距的情况下,利用式(6)可以计算目标角度偏差。因此,在线性区内,光学系统应该满足线性系统的要求。对激光导引头而言,其光学系统线性区的畸变一般要求在 0.5% 左右,才能满足线性度的要求。图7是在该光学系统在线性区内的畸变曲线,根据图中数据可知,在 5° 视场下的系统的畸变在 0.38% 左右,满足设计要求。

根据光斑的能量包围曲线,对光斑的能量分布进行分析。若光斑内能量分布均匀,则光斑能量和光斑半径之间满足关系式:

$$E = k \times \pi \times r^2 \quad (7)$$

式中, k 为单位面积上的能量。

图7 5° 视场下的系统畸变曲线Fig. 7 System distortion curve of the field of view 5°

若能量分布均匀,则光斑能量分布和光斑半径之间为二次曲线关系。该光学系统获得的光斑能量包围曲线如图8所示。通过图8可以看出,不同视场下的能量包围曲线都比较接近二次曲线,光斑能量分布比较稳定,基本满足设计要求。

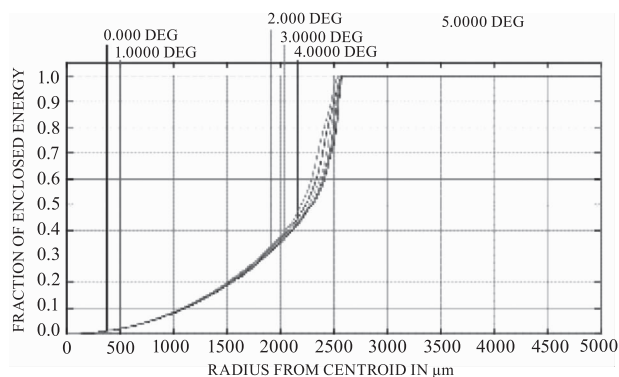


图8 能量包围曲线

Fig. 8 The encircled curve

5 结论

本文主要针对激光半主动导引头的光学系统进行设计和性能分析。对光学系统的参数进行了推导、分析和设计,并最终利用ZEMAX设计出一套满足性能指标的光学系统。首先基于单四象限探测器的工作原理对获取的光斑大小进行分析,其次利用光学系统的指标数据,对系统焦距进行估计。在获取光学系统相关参数后,通过控制系统像差、球差和系统畸变等参数,利用ZEMAX设计出合适的光学系统。最后,从光斑大小、系统畸变以及能量分布均匀性等角度对系统的成像质量进行了评价和分析,得出设计的该光学系统满足激光半主动导引头的指标参数要求的结论。

参考文献:

- [1] ZHUANG Xinyu, CHEN Zhaobing. Current status and its developing trend of semiactive laser guided weapon [J]. Ship Electronic Engineering, 2011, 31(6): 6-10. (in Chinese)
庄昕宇, 陈兆兵. 半主动激光精确末制导武器的发展现状与趋势[J]. 舰船电子工程, 2011, 31(6): 6-10.
- [2] FU Lianxiao, XU Song, JIAO Tong, et al. Development summarize of optical guidance technology[C]// Infrared, Remote Sensing Technology and Application Seminar and Interdisciplinary Forum, 2015. (in Chinese)
付联效, 徐松, 焦彤, 等. 光学制导技术发展综述[C]// 红外、遥感技术与应用研讨会暨交叉学科论坛, 2015.
- [3] TANG Yongtao, LIN Hongsheng, CHEN Chun, et al. The development and summary of modern missile seeker[J]. Guidance & Fuze, 2014, 35(1): 12-17. (in Chinese)
汤永涛, 林鸿生, 陈春, 等. 现代导弹导引头发展综述[J]. 制导与引信, 2014, 35(1): 12-17.
- [4] 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.
- [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, CHAN 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. 激光半主动制导导引头光学系统的设计[J]. 应用光学, 2012, 33(2): 402-405.
- [7] LIANG Weiwei, HUANG Zhenyu, ZHANG Wenpan, et al. Study on error signal of quadrant detectors in laser seekers[J]. Laser Technology, 2014, 38(4): 569-573. (in Chinese)
梁巍巍, 黄振宇, 张文攀, 等. 激光导引头四象限探测器偏差信号特性研究[J]. 激光技术, 2014, 38(4): 569-573.
- [8] LI Fuwei, ZHANG Yunqiang, PAN Guoqing. Analysis and design of optical system of laser semi-active proportional seeker[J]. Journal of Applied Optics, 2014, 35(6): 938-942. (in Chinese)
李福巍, 张运强, 潘国庆. 激光半主动比例导引头光学系统分析与设计[J]. 应用光学, 2014, 35(6): 938-942.
- [9] LIU Zhiying, XING Tianxiang. Optical system design for laser semi-active guided seeker[J]. Laser & Infrared, 2016, 46(5): 527-531. (in Chinese)
刘智颖, 邢天祥. 激光半主动导引头光学系统设计[J]. 激光与红外, 2016, 46(5): 527-531.