

用于四象限探测器非捷联激光导引头的镜头设计方法

邬 张书伟 张爽 姜颖 岑晔涛 田文静 孙科 胡淑姬 周寅

New lens design method for non-strapdown laser seeker based on four-quadrant detectors

WU Yang, ZHANG Shuwei, ZHANG Shuang, LOU Ying, CEN Yetao, TIAN Wenjing, SUN Ke, HU Shuji, ZHOU Yin

引用本文:

邬, 张书伟, 张爽, 等. 用于四象限探测器非捷联激光导引头的镜头设计方法[J]. 应用光学, 2025, 46(3): 549–554. DOI: 10.5768/JAO202546.0301001

WU Yang, ZHANG Shuwei, ZHANG Shuang, et al. New lens design method for non-strapdown laser seeker based on four-quadrant detectors[J]. Journal of Applied Optics, 2025, 46(3): 549–554. DOI: 10.5768/JAO202546.0301001

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202546.0301001>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

四象限探测器光斑检测原理及其研究进展

Principle and research progress of four-quadrant detector spot detection

应用光学. 2023, 44(5): 927–942 <https://doi.org/10.5768/JAO202344.0509001>

基于LitghtTools的激光四象限探测系统仿真

System simulation of laser four-quadrant detection system based on LitghtTools

应用光学. 2021, 42(1): 176–181 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0107004>

基于自准直原理的紧凑型激光位移传感器光学系统设计

Optical system design of compact laser displacement sensor based on auto-collimation principle

应用光学. 2023, 44(4): 720–725 <https://doi.org/10.5768/JAO202344.0401003>

用于激光定向红外对抗的光学系统设计

Optical system design for laser directional infrared countermeasure

应用光学. 2021, 42(3): 398–403 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0301004>

用于真空紫外探测器标定的光学斩波器研究

Optical chopper applied for calibration of vacuum ultraviolet detector

应用光学. 2022, 43(2): 325–330 <https://doi.org/10.5768/JAO202243.0204003>

用于中小型飞行模拟器的球带幕投影镜头的光学设计

Optical design of spherical zone projection lens for small and medium-sized flight simulator

应用光学. 2023, 44(1): 30–36 <https://doi.org/10.5768/JAO202344.0101005>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2025) 03-0549-06

引用格式: 邬旻, 张书伟, 张爽, 等. 用于四象限探测器非捷联激光导引头的镜头设计方法 [J]. 应用光学, 2025, 46(3): 549-554.

WU Yang, ZHANG Shuwei, ZHANG Shuang, et al. New lens design method for non-strapdown laser seeker based on four-quadrant detectors[J]. Journal of Applied Optics, 2025, 46(3): 549-554.



在线阅读

用于四象限探测器非捷联激光导引头的 镜头设计方法

邬 旻, 张书伟, 张 爽, 娄 颖, 岑晔涛, 田文静, 孙 科, 胡淑姬, 周 寅

(北方导航控制技术股份有限公司, 北京 100176)

摘 要: 介绍了四象限探测器用于激光制导的工作原理, 根据激光制导的技术要求和四象限探测器的工作特性, 提出激光导引头四象限探测器镜头设计改进方法。针对非线性关系不易求解的难题, 利用 Zemax 在序列模式下对四象限探测器镜头进行设计, 通过设置操作数控制光斑的能量分布, 使目标的角度偏差与四象限探测器输出信号成线性关系, 可以提高实时检测精度。结合应用背景进行仿真分析, 验证了此方法的可行性。仿真结果表明: 系统全视场为 $\pm 10^\circ$, 线性视场为 $\pm 0.8^\circ$, 焦距为 21 mm, 光斑半径约为 0.4 mm, 入瞳直径为 36 mm, 光学总长为 35 mm。此方法不需要光斑在探测器上能量均匀, 也不要每个视场的光斑尺寸一致, 大大简化了设计。

关键词: 四象限探测器; 激光导引头; 光学设计

中图分类号: TN249

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202546.0301001

New lens design method for non-strapdown laser seeker based on four-quadrant detectors

WU Yang, ZHANG Shuwei, ZHANG Shuang, LOU Ying, CEN Yetao,
TIAN Wenjing, SUN Ke, HU Shuji, ZHOU Yin

(North Navigation Control Technology Co., Ltd., Beijing 100176, China)

Abstract: The working principle of four-quadrant detector for laser guidance was introduced. According to the technical requirements of laser guidance and the working characteristics of four-quadrant detector, an improved method of lens design of four-quadrant detector for laser seeker was proposed. Aiming at the problem that nonlinear relationship was not easy to solve, the four-quadrant detector lens was designed by using Zemax in sequential mode, and the energy distribution of the light spot was controlled by setting operand, so that the angle deviation of the target was linearly related to the output signal of the four-quadrant detector, which could improve the real-time detection accuracy. The feasibility of this method was verified by simulation analysis combined with application background. The simulation results show that the full field of the system is $\pm 10^\circ$, the linear field of view is $\pm 0.8^\circ$, the focal length is 21 mm, the spot radius is about 0.4 mm, the pupil diameter is 36 mm, and the optical length is 35 mm. This method does not require uniform energy of light spots on the detector, nor does it require uniform size of light spots in each field of view, which greatly simplifies the design.

Key words: four-quadrant detector; laser seeker; optical design

引言

目前, 激光半主动导引头技术已经比较成熟^[1]。在激光半主动制导系统中, 弹体外部的激光雷达

发射激光, 导引头内部四象限探测器中的光学系统接收和汇聚由目标反射的激光, 再由控制系统对获得的光斑能量数据进行分析处理, 得到反射

收稿日期: 2024-04-09; 修回日期: 2024-05-20

基金项目: 某火箭弹激光半主动导引头项目

作者简介: 邬旻 (1986—), 男, 博士, 正高级工程师, 主要从事光学设计研究。E-mail: 356142922@qq.com

光在探测器上的偏移值,即脱靶量。控制器根据脱靶量控制舵机转动,调整导弹的飞行方向,直到偏移值为零,实现对目标精准打击^[2-5]。因此,激光半主动导引头光学系统的性能直接影响导引头的工作距离、精度等重要指标。

为了提高四象限光电系统的测角精度,大量的四象限探测器镜头设计方法被提出。在先前的研究中,均将光斑的能量均匀性以及在线性区间各个视场的光斑形状一致性作为设计指标^[6-8]。但仿真结果表明,即使满足以上2个条件,目标的脱靶量与四象限探测器输出信号并不能成线性关系^[9]。本文通过控制光斑能量的设计方式对四象限探测器镜头进行设计,使二者成线性关系,降低了设计难度,也解决了非线性关系不易求解的难题。

1 四象限探测器工作原理

目标反射的光斑到达四象限探测器光敏面,光电效应产生电压,4个探测象限输出的电压分别与光斑在探测器每个象限上的能量成正比^[10]。根据每个象限的输出电压大小,按照特定的算法计算出目标与镜头光轴的俯仰角和方位角偏差^[11]。

四象限探测器光束方位角、俯仰角示意图如图1所示。图1中, H 为光学系统的主点;经目标反射的光经过主点会聚到 M 点; xOy 为探测器所在平面; O 点为探测器中心; $\angle QHO$ 为光束的方位角,设为 ϕ ; $\angle PHO$ 为光束的俯仰角,设为 θ 。

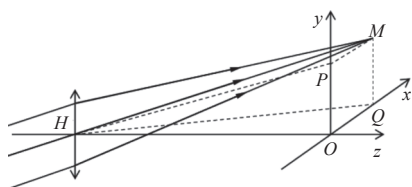


图1 四象限探测器光束方位角、俯仰角示意图

Fig. 1 Schematic diagram of four-quadrant detector beam azimuth angle and pitch angle

将四象限探测器的分割线作为分化直角坐标系的坐标轴,探测器中心为 O 点,探测器的水平和竖直分割线设为系统的 x 轴和 y 轴,探测器被分成A、B、C、D 4个部分,探测器的半径为 R ;将探测器光敏面光斑的质心点设为 O' 点,光斑的半径为 r ,如图2所示。

设 O' 点相对于 O 点在 x 轴和 y 轴方向上的偏移距离分别为 Δx 和 Δy ,即为脱靶量。光束的方位角 ϕ 和俯仰角 θ 分别为

$$\begin{cases} \tan \phi = \frac{\Delta x}{f} \\ \tan \theta = \frac{\Delta y}{f} \end{cases} \quad (1)$$

式中 f 为镜头的焦距。对于非捷联设计,线性区通常较小,可以认为 $\tan \theta \approx \theta$,则式(1)可近似为

$$\begin{cases} \phi \approx \frac{\Delta x}{f} \\ \theta \approx \frac{\Delta y}{f} \end{cases} \quad (2)$$

由式(1)可知,脱靶量与偏转角度成线性关系。

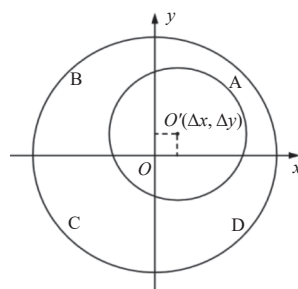


图2 四象限探测器工作原理示意图

Fig. 2 Schematic diagram of working principle of four-quadrant detector

若探测器中心点 O 和光斑质心 O' 重合,即 $\Delta x = \Delta y = 0$,说明四象限接收系统的光轴已经对准目标;若系统的光轴未与目标对准,则光斑质心 O' 点偏离四象限探测器的中心 O 点,即 $\Delta x \neq 0$, $\Delta y \neq 0$ 。根据光斑在4个象限上的能量分布对角度偏差进行计算,可判别目标偏离接收系统光轴的位置情况。

假设光斑在A、B、C、D 4个部分所对应的能量大小分别为 E_A 、 E_B 、 E_C 、 E_D ,则 x 、 y 方向上归一化偏差输出信号 E_x 、 E_y 为

$$\begin{cases} E_x = \frac{(E_A + E_D) - (E_B + E_C)}{E_A + E_B + E_C + E_D} \\ E_y = \frac{(E_A + E_B) - (E_C + E_D)}{E_A + E_B + E_C + E_D} \end{cases} \quad (3)$$

根据 x 和 y 方向上的输出归一化能量,可以解算出脱靶量,即:

$$\begin{cases} \Delta x = f(E_x) \\ \Delta y = f(E_y) \end{cases} \quad (4)$$

如果脱靶量与归一化能量成线性关系,则:

$$\begin{cases} \Delta x = k_x E_x \\ \Delta y = k_y E_y \end{cases} \quad (5)$$

式中: k_x 、 k_y 为比例常数。脱靶量的解算非常简单,然而实际情况下脱靶量和归一化能量都是非线性的,需要对它们进行复杂的标定工作。

当光斑在探测器光敏面上的位置变化时, 每个象限上光斑的面积就发生变化, 对应的输出能量也随之改变。经过重新计算, 可以得到光斑新的中心位置, 不断刷新对目标的定位, 实现制导跟踪功能。

2 激光导引头四象限探测器光学镜头设计

2.1 设计思路

现有的四象限探测器光学系统设计都是基于光斑能量呈均匀分布进行展开研究的, 并以此作为设计指标^[12-13]。设探测器直径为 10 mm, 光斑半径分别为 0.5 mm, 1 mm, 2 mm, 光学系统的焦距为 25 mm, 利用 Matlab 进行仿真, 在各视场光敏面上光斑形状、大小一致, 功率密度绝对均匀且没有任何像差的理想情况下, 目标脱靶量与四象限探测器归一化输出能量的关系曲线如图 3 所示。

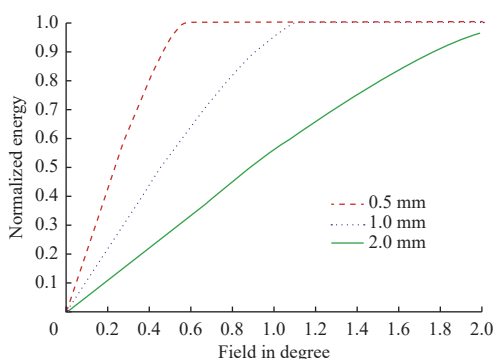


图 3 目标俯仰角 θ 与归一化输出能量 E_y 关系曲线

Fig. 3 Relationship curves of target pitch angle θ and normalized output energy E_y

从图 3 可以看出, 即使在理想成像情况下, 各个视场光斑大小完全一样, 能量完全平均, 不论光斑半径多大, 目标脱靶量与四象限探测器输出的归一化能量并不能成全范围的线性关系。为了解算脱靶量和输出归一化能量的关系, 通常通过查表法、迭代法和分段线性插值法等^[14]解决。但是这些方法增加了系统的复杂度, 并且标定过程中的各种误差可能会降低脱靶量解算的精确度。

本文提出了激光导引头四象限探测器镜头设计的改进方法: 利用 Zemax 在序列模式下对四象限探测器镜头进行设计, 通过设置操作数控制光斑的能量分布, 使目标脱靶量与四象限探测器输出的归一化能量成绝对的线性关系, 大大简化解算过程。

Zemax 作为一款广泛使用的光学设计软件, 其特点是多功能化和智能化, 通常情况下可以使用默认的评价函数进行成像优化^[15]。但是, 基于四象限探测器的镜头设计并不是传统的成像设计, 优化指标也不是使光斑最小或者波像差最小, 而是需要根据不同的设计需求自定义评价函数。例如, 以往的基于四象限探测器的镜头设计, 需要通过自定义操作数使不同视场光斑大小一致, 以及能量均匀分布, 由上面分析可知, 此种设计不可能使归一化能量和脱靶量达成完美的线性关系, 需要对归一化能量进行不同方法的解算, 然后进行脱靶量的计算。本文直接以脱靶量和归一化能量的线性关系为设计指标进行镜头设计。然而在 Zemax 中, 并没有对应的操作数来描述这一指标, 作者通过分析, 使用一种新的方法来量化这种设计要求。

以 y 轴为例, 若光斑偏离了中心位置, 脱靶量为 Δy , 如图 4 所示, 则此时归一化输出能量为

$$E_y = (E_{\text{蓝}} + E_{\text{红}} - E_{\text{绿}}) / (E_{\text{蓝}} + E_{\text{红}} + E_{\text{绿}}) \times 100\% \quad (6)$$

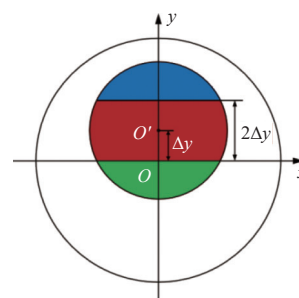


图 4 脱靶量 Δy 与圈入能量的关系示意图

Fig. 4 Diagram of relationship between miss distance Δy and loop energy

设 $E_{\text{总}}$ 为光斑的总能量, 则:

$$E_{\text{总}} = E_{\text{蓝}} + E_{\text{红}} + E_{\text{绿}} \quad (7)$$

非捷联镜头设计中线性区一般小于 2° , 系统像差由球差主导, 且球差是一种对称的像差。因此, 可以合理假设光斑是相对于中心对称的, 即 $E_{\text{绿}} = E_{\text{蓝}}$ 。则归一化能量 E_y 为

$$E_y = E_{\text{红}} / (E_{\text{蓝}} + E_{\text{红}} + E_{\text{绿}}) = E_{\text{红}} / E_{\text{总}} \quad (8)$$

为了使 E_y 与脱靶量 Δy 成线性关系, 需要满足条件:

$$\Delta y = k E_y = k (E_{\text{红}} / E_{\text{总}}) \quad (9)$$

由式(9)可知, $E_{\text{红}} / E_{\text{总}}$ 与 Zemax 中圈入能量函数即操作数 GENC 相对应, 因此只需设置优化操作数 GENC, 即:

$$\text{GENC}(E_y) = kE_y = \Delta y \tag{10}$$

由式 (10) 可知,脱靶量与角度偏差成线性关系,此时俯仰角与光斑圈入能量也为线性关系。同时说明,式(10)对于方位角也成立。

2.2 设计结果

某款激光导引头光学系统设计指标如表 1 所示。

表 1 光学系统设计指标	
Table 1 Optical system design specification	
参数	指标
波长/nm	1 064
线性区/(°)	±0.8
视场/(°)	±10
接收透镜通光孔径/mm	36
四象限探测器光敏面直径/mm	10
系统焦距/mm	21

根据设计指标选择初始结构,带入给定的设计要求进行优化,使用操作数 GENC,类型选择 3(y only),在 y 方向上视场选取 0°、0.2°、0.4°、0.6°、0.8°。针对每个视场控制光斑的圈入能量分布为线性,如图 5 所示(举例前 2 个视场),当 Δy 为 75 μm、150 μm、225 μm、300 μm 时,圈入能量 $E_{\text{红}}/E_{\text{总}}$ 为对应的线性 20%、40%、60%、80%。经过优化后得到的光学系统,如图 6 所示。

	类型	采样	波	视场	百分比	类型	参考	无衍射极限	目标	权重
1	GENC	▼	1	0	1 0.200	3	0	0	75.000	1.000
2	GENC	▼	1	0	1 0.400	3	0	0	150.000	1.000
3	GENC	▼	1	0	1 0.600	3	0	0	225.000	1.000
4	GENC	▼	1	0	1 0.800	3	0	0	300.000	1.000
5	GENC	▼	1	0	2 0.200	3	0	0	75.000	1.000
6	GENC	▼	1	0	2 0.400	3	0	0	150.000	1.000
7	GENC	▼	1	0	2 0.600	3	0	0	225.000	1.000
8	GENC	▼	1	0	2 0.800	3	0	0	300.000	1.000

图 5 GENC 操作数使用方法
Fig. 5 GENC operand usage

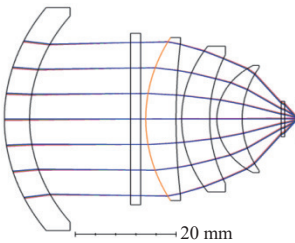


图 6 光学系统示意图
Fig. 6 Schematic diagram of optical system

光学系统由 3 片镜片、1 个滤光片和球罩组成。系统所用的材料为 H-K9L 与 H-ZLAF75A,镜片均为常用的球面镜片,避免使用昂贵的非球面。系统的入瞳直径为 36 mm,焦距为 21 mm,光

斑半径为 0.4 mm 左右,系统总长为 35 mm(不包括头罩),视场角为 ±10°。图 7 所示为线性视场内 0°~0.8°视场下的光斑点列图。从图 7 可以看出,不同视场下光斑大小和分布不完全一致,而圈入能量分布基本一致。同时,圈入能量与脱靶量有着较好的线性关系,如图 8 所示。使用 Matlab 导入 Zemax 的设计方案,根据光斑能量分布计算出不同视场下的归一化能量,如图 9 所示。从图 9 可以看出,在线性视场内,视场角与归一化能量呈现非常好的线性关系,可以省去后面较为繁琐的非线性标定工作,满足设计指标要求。

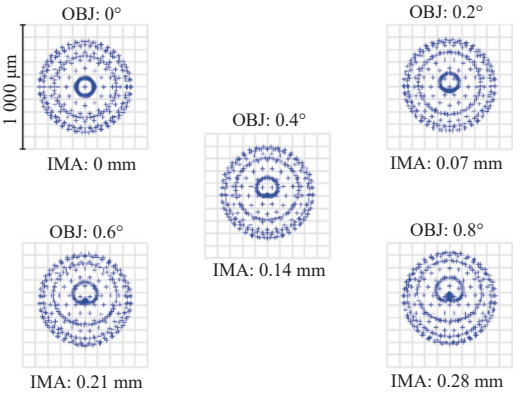


图 7 光斑点列图
Fig. 7 Light spot diagram

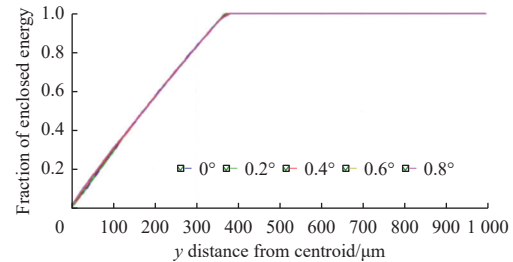


图 8 几何圈入能量

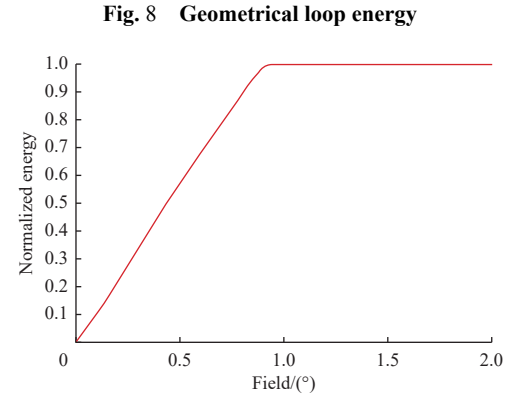


图 9 目标俯仰角与归一化输出能量关系曲线
Fig. 9 Relationship curve of target pitch angle and normalized output energy

系统的照度曲线图 10 所示。从图 10 中可以看出, 在最大视场为 10° 时, 照度也没有明显地下降, 满足设计需求。

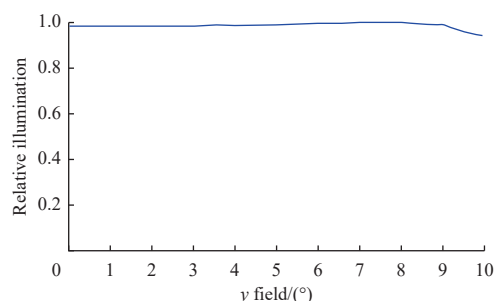


图 10 系统照度曲线

Fig. 10 System illuminance curve

3 结论

本文提出一种新的基于四象限探测器的镜头设计方法。分析了四象限探测器的工作原理, 根据激光导引头中基于四象限探测器光学系统的特点, 脱离了传统设计思路, 利用 Zemax 在序列模式下, 设置操作数控制光斑的能量分布, 设计了一种基于四象限探测器的镜头, 可使目标脱靶量与四象限探测器输出归一化能量成线性关系。系统全视场为 $\pm 10^\circ$, 线性视场为 $\pm 0.8^\circ$, 焦距为 21 mm, 光斑半径约为 0.4 mm, 入瞳直径为 36 mm, 光学系统总长为 35 mm。使用 Matlab 进行仿真分析, 验证了此方法的可行性, 为基于四象限探测器的光学系统设计提供了一种新的思路。

参考文献:

- [1] 陈成, 赵良玉, 马晓平. 激光导引头关键技术发展现状综述[J]. 激光与红外, 2019, 49(2): 131-136.
CHEN Cheng, ZHAO Liangyu, MA Xiaoping, et al. State-of-art of key technological issues of laser seeker[J]. Laser and Infrared, 2019, 49(2): 131-136.
- [2] 蒲小琴, 董全林, 余子箫, 等. 半主动激光导引头系统设计及线性度分析[J]. 航天器环境工程, 2020, 37(3): 303-309.
PU Xiaolin, DONG Quanlin, YU Zixiao, 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] 张军强, 谢飞, 薛庆生, 等. 基于四象限探测器的激光导引镜头的研制[J]. 中国光学, 2015, 8(3): 471-479.

- ZHANG Junqiang, XIE Fei, XUE Qingsheng, et al. Laser guided lens based on four-quadrant detector[J]. Chinese Optics, 2015, 8(3): 471-479.
- [4] 邱雄, 王仕成, 刘志国, 等. 激光导引头四象限探测器测角精度的建模研究[J]. 红外与激光工程, 2020, 49(7): 105-111.
QIU Xiong, WANG Shicheng, LIU Zhiguo, et al. Modeling research on angle measurement accuracy of four-quadrant detector of laser seeker[J]. Infrared and Laser Engineering, 2020, 49(7): 105-111.
- [5] 李征, 许昊宇, 梁静远, 等. 四象限探测器光斑检测原理及其研究进展[J]. 应用光学, 2023, 44(5): 927-942.
LI Zheng, XU Haoyu, LIANG Jingyuan, et al. Principle and research progress of four-quadrant detector spot detection[J]. Journal of Applied Optics, 2023, 44(5): 927-942.
- [6] 郑建锋. 激光导引头中基于四象限探测器的光学设计[J]. 光学技术, 2023, 49(1): 11-16.
ZHENG Jianfeng. Optical design based on four quadrant detector in laser seeker[J]. Optical Technique, 2023, 49(1): 11-16.
- [7] 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.
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.
- [8] 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.
LIU Zhiying, XING Tianxiang. Optical system design for laser semi-active guided seeker[J]. Laser & Infrared, 2016, 46(5): 527-531.
- [9] 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 Yawen, DONG Quanlin, PU Xiaoqin, et al. Analysis and design of optical system of laser semi-active seeker[J]. Laser & Infrared, 2018, 48(12): 1536-1540.
- [10] 郭小康, 张彦梅, 贺仕杰. 基于四象限探测器的光斑中心高精度定位算法[J]. 激光与红外, 2017, 47(11): 1353-1357.
GUO Xiaokang, ZHANG Yanmei, HE Shijie. Study on high precision positioning algorithm of spot center based on the four-quadrant detector[J]. Laser & Infrared, 2017, 47(11): 1353-1357.
- [11] 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 Licun, HE Wei. Laser spot center location algorithm based on four-quadrant detector[J]. Applied Laser, 2021, 41(3): 561-568.
- [12] 胡绍云, 李黎明, 周国家, 等. 激光测角装置光学系统设计与验证[J]. 激光杂志, 2023, 44(12): 23-28.
- HU Shaoyun, LI Liming, ZHOU Guojia, et al. Optical system design and verification for device of laser angle measurement[J]. Laser Journal, 2023, 44(12): 23-28.
- [13] 顾姗姗, 郭玉, 句源, 等. 四象限探测器镜头光学质量的检查系统设计[J]. 光学学报, 2022, 42(2): 1-8.
- GU Shanshan, GUO Yu, JU Yuan, et al. Design of optical quality detection system for four-quadrant detector lens[J]. Acta Optical Sinica, 2022, 42(2): 1-8.
- [14] 周培松, 卢荣胜, 周维虎, 等. 四象限探测器用于激光跟踪仪目标脱靶量测量[J]. 光电技术应用, 2014, 29(1): 75-79.
- ZHOU Peisong, LU Rongsheng, ZHOU Weihu, et al. Measurement system for laser tracker's target-missing quantity based on four-quadrant detector[J]. [Electro-optic Technology Application](#), 2014, 29(1): 75-79.
- [15] 陈洪芳, 汤亮, 孙衍强, 等. 基于 Zemax 仿真的激光追踪测量光学系统能量分析[J]. 中国激光, 2018, 45(7): 183-190.
- CHEN Hongfang, TANG Liang, SUN Yanqiang, et al. Zemax simulation based energy analysis of optical system for laser tracking measurement[J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(7): 183-190.