

激光与光电子学进展

目标识别近距离车载镜头光学系统设计

朱逸臻, 李顺尧, 卓双木, 杨兰*

集美大学理学院, 福建 厦门 361021

摘要 基于人工智能目标识别,设计了一款分辨率高、视场角宽的近距离车载前视天塞型镜头。利用 ZEMAX 软件,通过控制场曲、畸变等几何像差进行参数优化设计,当设计的镜头像方空间 F 数为 3.4,焦距为 6 mm,最大视场角为 50° ,景深为 10 m 时,得到空间频率 107 lp/mm 处的全视场调制传递函数均高于 0.65,畸变小于 0.305%,满足设计要求。最后对镜头的各项公差进行蒙特卡罗分析,结果表明,公差均在可加工范围内,适合常规生产加工和装配。

关键词 光学设计; 车载镜头; 调制传递函数; 景深; 公差分析

中图分类号 TN202; TB851.1

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.1722001

Designing Optical Systems for Close-Distance Vehicle Lenses in Target Recognition

Zhu Yizhen, Li Shun Yao, Zhuo Shuangmu, Yang Lan*

College of Science, Jimei University, Xiamen 361021, Fujian, China

Abstract A close-distance vehicle front-view Tessar lens with strong distinguishability and broad field of view was designed based on artificial intelligence target recognition. Using ZEMAX software, parameter optimization design is carried out by controlling geometric aberrations such as field curvature and distortion. When the designed lens has F -number of 3.4, focal length of 6 mm, maximum field of view of 50° , and depth of field of 10 m, the modulation transfer function of the entire field of view at the spatial frequency of 107 lp/mm is higher than 0.65, and the distortion is less than 0.305%, which meets the design requirements. According to the Monte Carlo study, the tolerances are within the machinable range, making them suitable for conventional production and assembly.

Key words optical design; automotive lens; modulation transfer function; depth of field; tolerance analysis

1 引言

先进驾驶辅助系统(ADAS)利用安装于车上的传感器监控车前、后方各种目标、障碍物,以实现人工智能目标识别^[1-2]。随着自动驾驶车载技术的发展,对前视车载镜头的技术要求越来越高,主要体现在镜头组系分类细化,包含中远距离镜头、近距离镜头^[3]。中远距离镜头要求图像分辨率高、视场角尽可能大;近距离镜头要求分辨率高、畸变小、成像清晰,除视场角大之外还要求视场角与景深尽可能匹配^[4]。天塞型物镜是具有中等光学特性的照相物镜,由于其结构简单、镜片数量不多,故能量损失较少,是成像质量较好、成本适中的市场主流产品。

通常如果镜头的视场角足够大,则其景深必然会受到限制^[5]。目前基于人工智能目标识别的近距离车载镜头存在的问题是视场角 ω 不够大,一般在 $8^\circ \sim 35^\circ$ 之间^[6-7],或者景深与视场角不能合理匹配,像质畸变较高,一般在 5% 左右,减小了有效目标识别范围等。本文利用三片分离式光学系统作为初始结构,通过引入双胶合透镜将三片分离式改为四片三组式天塞镜头^[6],并调整前后工作距离等参数预先约束优化主要设计指标(景深、视场角、畸变)得到一款畸变小(全视场最大畸变为 0.305%)、能量集中、全视场角 ω 较宽($\omega=50^\circ$)且满足景深要求的近距离车载前视镜头。

收稿日期: 2021-10-15; 修回日期: 2021-12-18; 录用日期: 2022-01-05

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(81771881)、福建省杰出青年基金滚动项目(2018J07004)、国家级大学生创新训练项目(201910390026)

通信作者: *yanglan@jmu.edu.cn

2 光学系统设计过程

2.1 镜头光学设计参数确定

目前人工智能目标识别的汽车是靠安装传感器来探测前方目标范围的,本文针对近距离设计车载前视镜头。根据实际路况,近距离车载前视镜头的设计要求如下:全视场角约为 50° ,焦距为 6 mm,景深为 10 m,最大畸变小于 2%,像方空间 F 数为 3.4。要求所设计的镜头能够对前方 x 为 5 m 的目标进行良好成像,水平视场宽度 y 达到 4.5~4.7 m,根据常规乘用车的外形尺寸,设定镜头的安装高度 H 在 1.5~1.8 m 范围内。如图 1 所示,则镜头的水平视场角^[5]为

$$\omega = 2\arctan \frac{y}{2x} = 2 \times \arctan \frac{4.6}{2 \times 5} = 49.53^\circ \approx 50^\circ, (1)$$
式中: x 是物距; y 是 x 处的水平视场宽度。

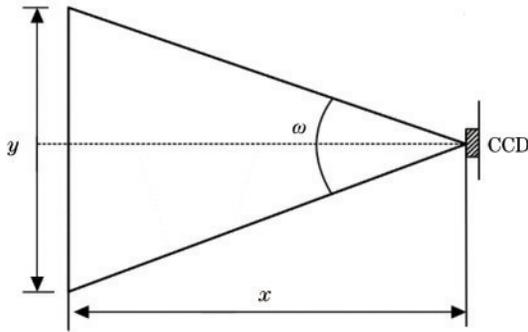


图 1 镜头水平视场角示意图

Fig. 1 Schematic of horizontal field angle of lens

本设计采用市面上常规平面 1/3 英寸(1 英寸 = 2.54 cm)CCD 图像传感器,CCD 有效感光面尺寸为 5.6 mm×3.6 mm。CCD 画幅选用尺寸 24 mm×36 mm,故可得允许弥散圆直径 δ 为 0.035 mm。

如图 2 所示,可计算出镜头的焦距和全视场角。所设计镜头的焦距^[7]为

$$f = \frac{y' \times x}{y} = \frac{5.6 \times 5}{4.6} = 6.08 \text{ mm}, (2)$$

式中: y' 为 CCD 焦平面探测器的水平宽度。

人工智能目标识别只有获得目标的完整图像,相

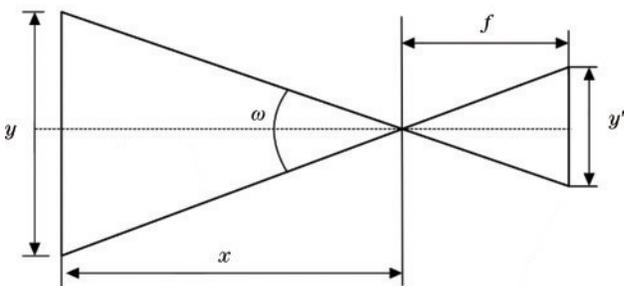


图 2 焦距计算示意图

Fig. 2 Schematic of focal length calculation

关算法才能对目标进行准确识别,故其景深参数非常重要。为了保证足够的进光量,设定镜头光圈数 $F=3.4$,如图 3 所示。

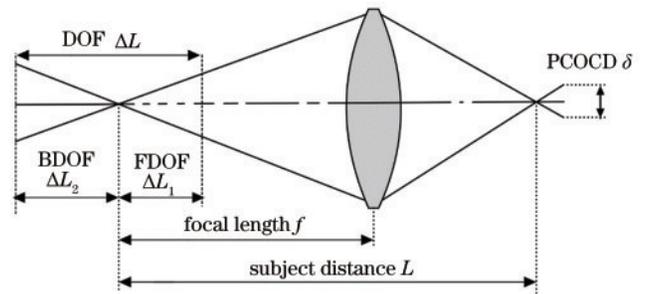
前景深、后景深、景深^[8]分别表示为

$$\Delta L_1 = \frac{F\delta L^2}{f^2 + F\delta L} = 4.715 \text{ m}, (3)$$

$$\Delta L_2 = \frac{F\delta L^2}{f^2 - F\delta L} = 5.322 \text{ m}, (4)$$

$$\Delta L = \Delta L_1 + \Delta L_2 = 10.037 \text{ m}, (5)$$

式中: ΔL_1 为前景深; ΔL_2 为后景深; ΔL 为景深; F 为光圈数; δ 为容许弥散圆直径; L 为系统设定对焦距离; f 为光学系统焦距。综合上述计算结果可得,所设计镜头景深在可视范围 0.285~10.322 m 内,图像均是清晰可识别的。



DOF: depth of field

FDOF: front depth of field

BDOF: back depth of field

PCOCD: permissible circle of confusion diameter

图 3 景深示意图

Fig. 3 Schematic of depth of field

若所设计的中短距离镜头与 CCD 探测器匹配,则镜头的分辨率必须满足以下条件:1)CCD 像素尺寸乘以镜头分辨率约等于 0.5;2)在各视场角下调制传递函数(MTF)值 ≥ 0.5 ,系统的畸变等控制在 0.5% 以内^[9-10]。本设计选用的 CCD 像元尺寸为 $4.66 \mu\text{m} \times 4.66 \mu\text{m}$,所以该镜头的奈奎斯特频率^[11]为 $(1/2)/(4.66 \times 10^{-3}) = 107.30 \text{ lp/mm}$ 。综上可以得到对应的天塞型车载镜头结构设计指标,如表 1 所

表 1 天塞型车载镜头的设计指标

Table 1 Design indexes of Tessar vehicle lens

Parameter	Value
Focal length /mm	6
Entrance diameter /mm	1.76454
Half field of view /($^\circ$)	25
Spectral range / μm	0.486-0.656
Relative distortion /%	<0.5
Modulation transfer function	$\geq 0.5@107 \text{ lp/mm}$
Spotradius encircled 80% energy / μm	<3.2
Depth of field /m	10

示。镜头焦距 $f=6\text{ mm}$ ，全视场 $\omega=50^\circ$ ，对焦距距离 $L=5\text{ m}$ ，景深 $\Delta L=10.037\text{ m}$ ，系统畸变小于 0.5% 。

2.2 初始结构选择

三片分离式镜头具有结构对称、简单、像差校正能力好等优点，因此在摄像、投影系统中均有广泛应用。本文以三片分离式镜头作为初始结构，如图 4 所示，初始结构镜头的有效焦距长度为 5.99463 mm ，总长为 10.7487 mm ，工作 F 数为 3.3844 ，选用价格适中、高色散的成都光明公司普通光学玻璃，其折射率分别是 $n_1=1.946$ 、 $n_2=1.8081$ 和 $n_3=1.7186$ 的氧化铍 (BeO) 玻璃。镜头阿贝数分别是 $v_1=17.944$ 、 $v_2=22.691$ 和 $v_3=93.252$ 。

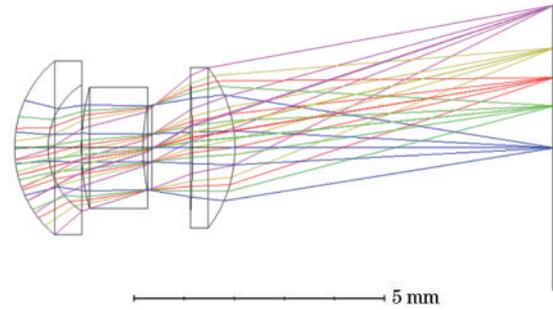


图 4 初始结构图

Fig. 4 Initiating structure figure

初始结构的镜面参数如表 2 所示。

表 2 初始结构参数

Table 2 Initiating structure parameter

unit:mm

Parameter	Lens 1		Lens 2		Stop	Lens 3		Image
Sequence	1	2	3	4	5	6	7	8
Radius	2.021	1.362	3.939	3.058	Infinity	-19.940	-2.338	Infinity
Thickness	0.670	0.665	1.231	0.182	0.802	0.849	6.351	

2.3 优化设计

本设计将三片分离式镜头的第三个镜片调整为双胶合镜片，改变第一片与第二片镜片的距离，微调第二个镜片的弯曲度，以调整球面像差，组合成四片三组式天塞型结构镜头。

利用缩放法对天塞型结构镜头的参数进行优化改进，焦距缩放公式^[12]为

$$r'' = r' \frac{f''}{f'} \quad (6)$$

$$d'' = d' \frac{f''}{f'} \quad (7)$$

式中： f' 为初始结构的焦距； f'' 为设计所要求的焦距； r' 为初始结构的曲率半径； r'' 为缩放后的曲率半径； d' 为初始结构的透镜厚度； d'' 为缩放后的透镜厚度。按照公式计算出缩放后透镜的曲率半径和厚度，再将各参数输入 ZEMAX 光学软件^[13]。

优化时，首先，设定优化函数是以镜头质心为参考的几何类型^[4]，为保证优化过程中能兼顾每个视场的成像质量，在优化函数中加入所有视场角。设定系统自动生成一系列操作数，添加“EFFL(焦距)”操作数用以控制镜头焦距为 6 mm 。

然后，优化后的镜头要求像质和光学性能不但能达到预期的总体设计要求，而且要便于生产加工，并尽可能地降低生产成本，这就限制了其结构参数。在实际生产中考虑到入瞳不能紧贴第一片透镜，所以控制入瞳与第一片透镜之间的空气间隔为 $1.5\sim 2\text{ mm}$ ，通过操作数 CTGT(两面之间中心距离)控制空气间隔。

最后，通过分析场曲和畸变曲线、点列图、MTF 曲

线^[14-16]可以发现，镜头存在彗差、球差和畸变等像差，故加入相对应的操作数对镜头进行优化^[17-18]。优化步骤如下：分别加入操作数 COMA(彗差)、SPHA(球差)和 DIMX(某视场下畸变上线)对镜头的彗差、球差和畸变进行控制^[19]。加入 RSCH(RMS 光斑半径)操作数对点列图的光斑半径进行约束。为防止优化后的镜头结构因某个面厚度过大而导致镜头无法实际生产^[13]，加入了 MNCA(空气的最小中心厚度)、MXCA(空气的最大中心厚度)、MNEA(空气的最小边缘厚度)和 MNCG(玻璃的最小中心厚度)、MXCG(玻璃的最大中心厚度)、MNEG(玻璃的最小边缘厚度)操作数对空气厚度边界和玻璃厚度边界进行控制。将玻璃厚度和曲率半径依次设为变量，玻璃材料设为“替代”，反复锤炼得到优化的玻璃参数。最后做公差分析^[20-21]，再进行参数微调。

2.4 设计结果

优化后的镜头光学系统结构如图 5 所示。镜头由四片透镜组成，所有透镜均容易加工。镜头有效焦距

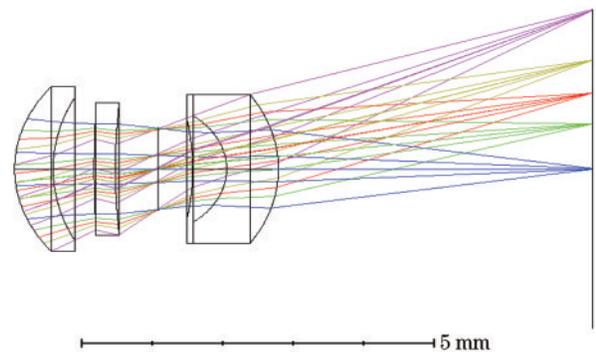


图 5 天塞结构三维视图

Fig. 5 Three-dimensional view of Tessar structure

长度为 5.99944 mm, 后方焦距长度为 4.47982 mm, 光学总长度为 8.17987 mm, 最大口径为 2.779 mm, 透镜最大厚度为 4.445 mm, 因此外形尺寸完全符合装配要

求, 较短的光学总长可以保证镜头适应车内有限的空间, 更容易安装于车载系统。

优化后的镜头参数如表 3 所示。

表 3 优化后的镜头结构参数

Table 3 Lens structure parameters after optimization

Parameter	Lens 1				Lens 2				Stop	Lens 3		Lens 4		Image
	1	2	3	4	5	6	7	8	9					
Sequence	1	2	3	4	5	6	7	8	9					
Radius	2.246	2.704	22.058	11.910	Infinity	-4.611	-1.147	-2.310	Infinity					
Thickness	0.546	0.581	0.300	0.600	0.495	0.479	0.733	4.445						

图 6 是优化前后场曲和畸变曲线图。由图 6 可知, 在半视场角为 25° 时, 优化前弧矢和子午场曲分别为 0.0350 mm 和 0.0096 mm, 优化后弧矢和子午场曲下

降为 0.0073 mm 和 0.00346 mm, 仅为初始结构的 21% 和 36%。最大畸变由 4.83% 降为 0.305%, 下降显著。满足全视场畸变小于 0.50% 的设计指标。

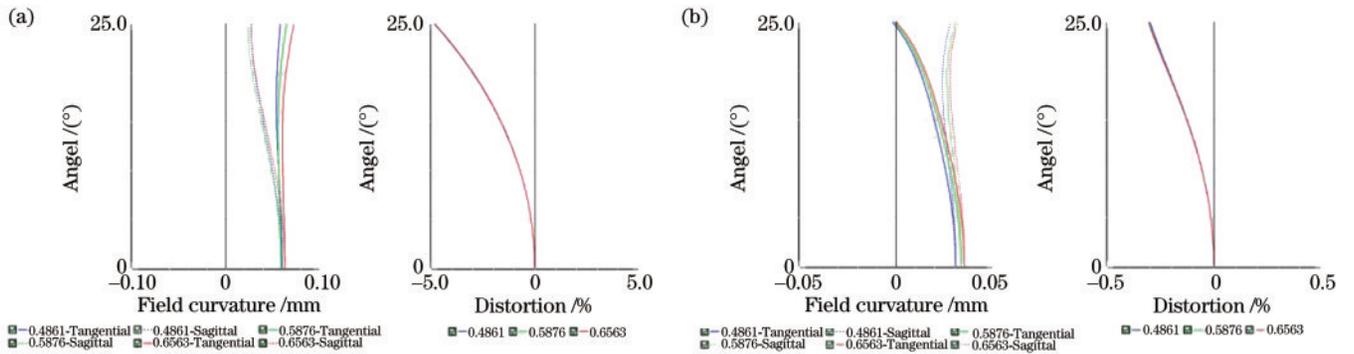


图 6 优化前后场曲和畸变曲线。(a)优化前;(b)优化后

Fig. 6 Field curvature and distortion curves before and after optimization. (a) Before optimization; (b) after optimization

图 7 是优化前后点列图对比。由图 7 可知, 当视场角分别为 0.00°、7.50°、12.50°、17.68°、25.00° 时: 优化前弥散圆均方根(RMS)半径为 2.424~4.911 μm, 弥散圆几何(GEO)半径为 4.571~15.464 μm; 优化后弥散圆 RMS 半径为 1.722~2.148 μm, 弥散圆 GEO 半径为 3.400~5.504 μm。各视场弥散圆 RMS 半径差值较小, 说明光分布均匀^[22]。其次, 全视场的弥散圆

RMS 半径均小于艾里斑半径, 说明光能集中程度好。弥散圆 GEO 半径集中在 3.421 μm 附近, 由此可知, 无论中心视场还是边缘视场^[23], 像点成像均清晰。

图 8 是天塞型结构镜头的光学 MTF 曲线图。优化后在 190 lp/mm 处, 所有视场的 MTF 值大于 0.5, 在 107 lp/mm 处, 所有视场的 MTF 值均大于 0.65, 说明优化后镜头对识别目标图像精细度、图像层次和外

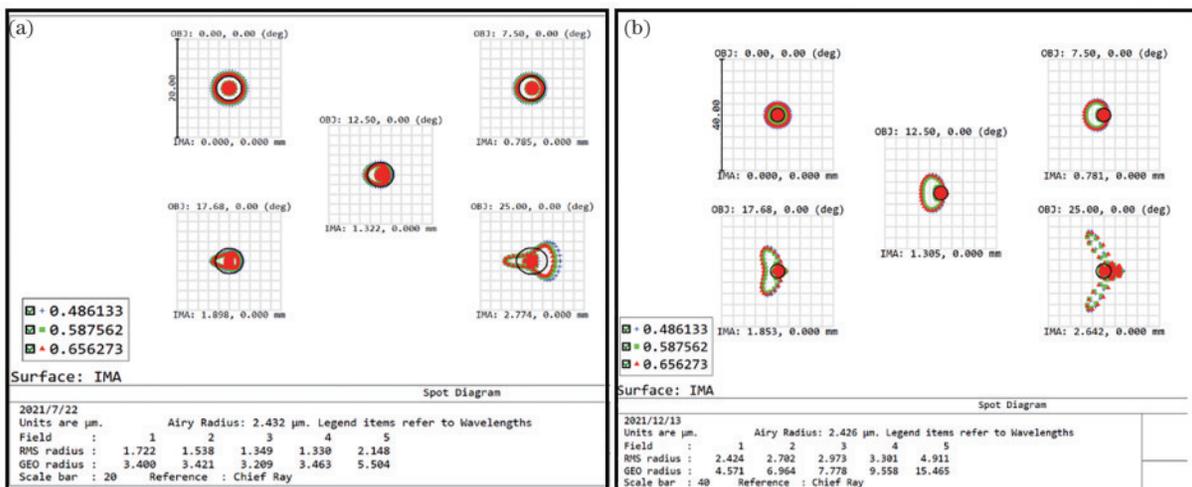


图 7 优化前后点列图对比。(a)优化前;(b)优化后

Fig. 7 Comparison of spot diagram before and after optimization. (a) Before optimization; (b) after optimization

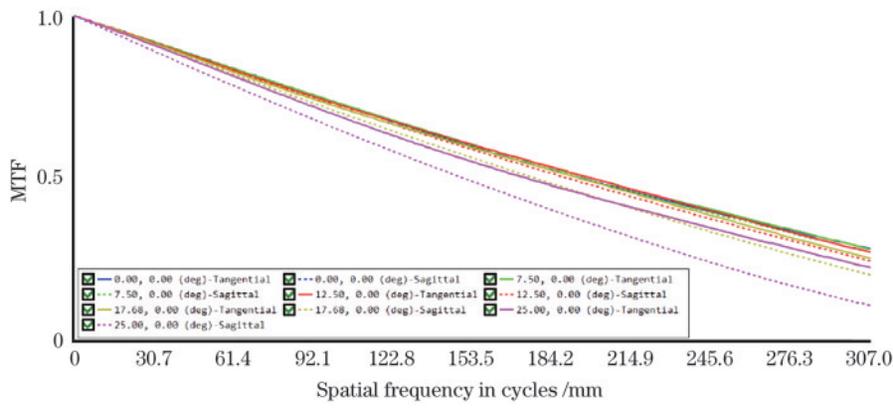


图8 MTF 曲线图

Fig. 8 Diagram of MTF curve

形轮廓等光衍射信息能在较宽频率(0~190 lp/mm)中精确传递^[12],图像清晰、成像质量较高,完全满足镜头设计要求。

3 公差分析

除了设计中对系统像差进行补偿优化之外,在实际加工、装配过程中,镜片组件、镜片曲率中心偏离或倾斜、间隔圈加工、玻璃阿贝数误差和组装精度等问题都会产生一定的加工系统误差,势必影响镜头的整体性能,故必须进行公差分析。本文利用ZEMAX提供的公差分析功能,模拟组件加工、装配过程中的系统公差。首先设置初始的参数允差。表面公差如下:曲率半径为0.03 mm,厚度间隔为±0.03 mm, x 偏心为0.03 mm, y 偏心为0.03 mm,倾斜 x 轴为±0.03 mm,倾斜 y 轴为±0.03 mm。元件公差如下:倾斜 x 轴为±0.03°,倾斜 y 轴为±0.03°。折射率公差为0.001,阿贝数公差为1%。采用灵敏度分析法,以特征频率107 lp/mm时的MTF值作为敏感度分析评价标准,计算对系统影响最敏感的公差,经蒙特卡罗分析循环300次可得结果,如表4所示。镜头第一面的表面偏心公差最敏感,第二面的厚度公差和第三面的半径公差较为敏感,且此光学系统对透镜材料阿贝的色散系数要求不高,因此本镜头要在加工和装配过程中对上述

表4 最敏感的公差分析结果

Table 4 Results of the most sensitive tolerance analysis

unit: mm

Type	Value	Criterion	Change
TSDX 1	0.01000000	0.61998101	-0.04294991
TSDY 1	0.01000000	0.61998101	-0.04294991
TSDX 1	-0.01000000	0.61998101	-0.04294991
TSDY 1	-0.01000000	0.61998101	-0.04294991
TTHI 2 4	0.03000000	0.62469954	-0.03642230
TFRN 3	1.00000000	0.62650862	-0.03642230
TEDY 1 2	-0.02000000	0.62804440	-0.03488652
TEDX 1 2	-0.02000000	0.62804440	-0.03488652
TEDX 1 2	0.02000000	0.62804440	-0.03488652
TEDY 1 2	0.02000000	0.62804440	-0.03488652

公差进行规避。表4中,TSDX为表面 x 偏心/倾斜公差,TSDY为表面 y 偏心/倾斜公差,TTHI为厚度公差,TFRN为半径公差,TEDY为元件 y 偏心/倾斜公差,TEDX为元件 x 偏心/倾斜公差。

表5是零件允许公差。可以看出,允许公差经多次调试后均在合理范围内,能对加工装配误差预留一定空间,说明其可以满足实际生产和装配要求。

表5 零件允许公差

Table 5 Allowable tolerances for parts

Surface	1	2	3	4	5	6	7	8
Radius tolerance	±3	±3	±1	±1		±3	±3	±3
Thickness tolerance /mm	±0.03	±0.03	±0.02	±0.03	±0.02	±0.02	±0.02	
Element eccentricity tolerance /mm	±0.02		±0.02			±0.02		
Surface eccentricity tolerance /mm	0.01	0.01	0.02	0.02		0.01	0.005	0.005
Surface irregularity	±0.2	±0.2	±0.1	±0.2		±0.2	±0.2	±0.2
Refractive index	0.001		0.001			0.001	0.001	
Abbe coefficient tolerance /%	±0.9		±2.6			±0.7	±0.4	

表 6 是蒙特卡罗公差分析结果。可以看出,90% 的蒙特卡罗样本 MTF 值大于 0.486,80% 的蒙特卡罗样本 MTF 值大于 0.511。综上所述,本系统镜头公差合理,对玻璃材料要求较宽松,仅常规 Na_2SiO_3 、 CaSiO_3 普通型即可,而且加工装配方便,具有较好的制造工艺性。

表 6 蒙特卡罗公差分析结果
Table 6 Results of Monte Carlo tolerance analysis

Number of Monte Carlo samples / %	MTF value
>90	0.48677996
>80	0.51156053
>50	0.55240768
>20	0.59662360
>10	0.61346962

4 结 论

为了满足智能汽车对前方近距离目标的识别准确率和成像质量的要求,设计了一款天塞型车载镜头。首先根据实际应用需要,确定光学设计指标,然后依据设计指标利用 ZEMAX 软件进行像质分析和参数优化。根据优化结果,对镜头成像质量和生产工艺进行评估。结果表明,当所设计的车载镜头焦距为 6 mm,全视场角为 50° ,景深为 10.037 m 时,畸变较小(全视场最大畸变为 0.305%),经 300 次蒙特卡罗循环测试可知,光学系统公差较合理。各项指标均满足设计要求,在空间频率 107 lp/mm 处的 MTF 值均高于 0.65,光学系统成像质量较好。本镜头采用中高档天塞型镜头,镜片数少,所采用的材料为普通玻璃材料成本适中、加工装配方便,能满足实际批量生产需求。

参 考 文 献

- [1] 孙爱平, 龚杨云, 陈忠, 等. 大孔径、大视场辅助驾驶仪红外镜头无热化设计[J]. 红外技术, 2013, 35(10): 617-622.
Sun A P, Gong Y Y, Chen Z, et al. Athermal design of a large-aperture, wide-field assisting pilot infrared lens[J]. Infrared Technology, 2013, 35(10): 617-622.
- [2] 乔健. 舰载光电成像系统探测能力分析[J]. 光学精密工程, 2013, 21(10): 2520-2526.
Qiao J. Analysis on detection ability of shipborne optoelectronic equipment[J]. Optics and Precision Engineering, 2013, 21(10): 2520-2526.
- [3] 王龙, 王永仲, 沈学举, 等. 基于迈克耳孙干涉仪的凝视型激光告警系统设计[J]. 中国激光, 2011, 38(3): 0312003.
Wang L, Wang Y Z, Shen X J, et al. Design of staring laser threat detection system based on Michelson interferometer[J]. Chinese Journal of Lasers, 2011, 38(3): 0312003.
- [4] 张宝龙, 李丹, 张少敬, 等. 非球面鱼眼镜头设计及畸变校正算法研究[J]. 光学学报, 2014, 34(12): 1222001.

- Zhang B L, Li D, Zhang S J, et al. Design of aspheric fisheye lens and study of distortion correction algorithms[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(12): 1222001.
- [5] 晏恒峰, 陈继民, 邵军. 基于后动态聚焦振镜系统激光打点优化研究[J]. 中国激光, 2013, 40(9): 0903006.
Yan H F, Chen J M, Shao J. Study on laser dots marking based on dynamic focusing galvanometer system[J]. Chinese Journal of Lasers, 2013, 40(9): 0903006.
- [6] 黄振永, 卢春莲, 俞建杰. 基于 ZEMAX 的光学设计教程[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2013.
Huang Z Y, Lu C L, Yu J J. Optical design tutorials based on ZEMAX software[M]. Harbin: Harbin Engineering University Press, 2013.
- [7] 朱军彦, 丁桂林. 一款车载镜头设计[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(10): 102203.
Zhu J Y, Ding G L. Design of a vehicle-mounted camera lens[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(10): 102203.
- [8] 毛文炜. 光学工程基础(一)[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006.
Mao W W. Optical engineering fundamentals(part one)[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2006.
- [9] 闫阿奇, 杨建峰, 曹剑中, 等. 航天鱼眼相机光学系统设计的研究[J]. 光学学报, 2011, 31(10): 1022004.
Yan A Q, Yang J F, Cao J Z, et al. Optical system design of space fisheye camera[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(10): 1022004.
- [10] Park J, Brady D J, Zheng G A, et al. Review of bio-optical imaging systems with a high space-bandwidth product[J]. Advanced Photonics, 2021, 3(4): 044001.
- [11] 于雪莲, 郭冰梅, 李秀芳, 等. 基于虹膜识别的小畸变手机镜头设计[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(1): 012204.
Yu X L, Guo B M, Li X F, et al. Design of small distortion phone lens based on iris recognition[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(1): 012204.
- [12] 刘钧, 高明. 光学设计[M]. 2 版. 北京: 国防工业出版社, 2016.
Liu J, Gao M. Optical design[M]. 2nd ed. Beijing: National Defense Industry Press, 2016.
- [13] 侯国柱, 吕丽军, 曹一青. 基于 ZEMAX 的大视场投影镜头设计[J]. 应用光学, 2016, 37(5): 742-746.
Hou G Z, Lyu L J, Cao Y Q. Design of large FOV projection lens based on ZEMAX[J]. Journal of Applied Optics, 2016, 37(5): 742-746.
- [14] 郁道银, 谈恒英. 工程光学[M]. 2 版. 北京: 机械工业出版社, 2006.
Yu D Y, Tan H Y. Engineering optics[M]. 2nd ed. Beijing: China Machine Press, 2006.
- [15] 杨兰, 蔡晓梅, 周雄图, 等. 圆孔液晶透镜的 ZEMAX 设计与优化[J]. 发光学报, 2017, 38(12): 1688-1694.
Yang L, Cai X M, Zhou X T, et al. Design and optimization of round hole LCD lens based on ZEMAX[J]. Chinese Journal of Luminescence, 2017, 38(12): 1688-1694.
- [16] Cai T, Tang S W, Zheng B, et al. Ultrawideband chromatic aberration-free meta-mirrors[J]. Advanced

- Photonics, 2020, 3(1): 016001.
- [17] 罗春华, 岳品良, 张东虎, 等. 变焦投影物镜光学系统设计[J]. 应用光学, 2017, 38(2): 180-186.
Luo C H, Yue P L, Zhang D H, et al. Optical design of zoom projection lens[J]. Journal of Applied Optics, 2017, 38(2): 180-186.
- [18] 杨晋, 张锐, 潘明忠, 等. 大孔径面视场 PG 成像光谱仪的光学设计[J]. 光学精密工程, 2017, 25(4): 335-342.
Yang J, Zhang R, Pan M Z, et al. Optical design of PG imaging spectrometer with large aperture and surface field [J]. Optics and Precision Engineering, 2017, 25(4): 335-342.
- [19] Lemaitre G, Vola P, Muslimov E. Active optics in astronomy: freeform mirror for the MESSIER telescope proposal[J]. Mathematical and Computational Applications, 2018, 24(1): 2.
- [20] 林正, 徐苗, 余华恩, 等. 广角微型投影镜头设计[J]. 光学仪器, 2017, 39(4): 49-53.
Lin Z, Xu M, Yu H E, et al. Design of wide-angle mini-projector lens[J]. Optical Instruments, 2017, 39(4): 49-53.
- [21] Shen Z X, Zhou S H, Li X N, et al. Liquid crystal integrated metalens with tunable chromatic aberration[J]. Advanced Photonics, 2020, 2(3): 036002.
- [22] 萧泽新. 工程光学设计[M]. 2 版. 北京: 电子工业出版社, 2008.
Xiao Z X. Engineering optics design[M]. 2nd ed. Beijing: Publishing House of Electronics industry, 2008.
- [23] 孟祥月, 王洋, 张磊, 等. 大相对孔径宽光谱星敏感器光学镜头设计[J]. 红外与激光工程, 2019, 48(7): 190-197.
Meng X Y, Wang Y, Zhang L, et al. Lens design of star sensor with large relative aperture and wide spectral range [J]. Infrared and Laser Engineering, 2019, 48(7): 190-197.