

用于车辆目标识别的中远距离车载镜头设计

张思远, 谢 飞, 王建华

吉林大学汽车工程学院, 吉林 长春 130022

摘要 为了提高无人驾驶汽车对中远距离车辆目标的识别准确率, 满足无人驾驶汽车对前方预瞄距离的要求, 通过理论计算以及光学设计软件 ZEMAX-EE, 研究设计了一款适合安装于乘用车上的中远距离车载镜头。为了满足车载镜头在实际使用过程中对成像范围的要求, 利用成像景深公式计算了对准距离为无穷远时, 不同入瞳直径对应的成像范围, 从而确定了满足实际使用条件、易于设计和检验的镜头参数设计方案。车载镜头的焦距为 40 mm, 视场角为 8.6° , 入瞳直径为 7 mm, 景深为 30 m~ $+\infty$, 系统总长小于 38 mm。仿真分析结果表明, 所设计车载镜头具有良好的成像质量, 能够满足实际的使用要求。

关键词 光学设计; 车载镜头; 畸变校正; 车辆目标识别; 无人驾驶汽车

中图分类号 O439 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP54.102201

Design of Medium and Long Distance Automotive Lens for Target Recognition of Vehicles

Zhang Siyuan, Xie Fei, Wang Jianhua

College of Automotive Engineering, Jilin University, Changchun, Jilin 130022, China

Abstract In order to improve the recognition accuracy of medium and long distance vehicle targets and meet the requirements of the forward preview distance of pilotless automobile, a type of medium and long distance automotive lens suitable for passenger cars is studied through theoretical calculation and optical design software ZEMAX-EE. To meet the requirements of the imaging range of the vehicle lens during actual use, the imaging range with different entrance pupil diameters is calculated by using the depth of field formula, when the aiming distance is infinity. Then the lens parameter design scheme which satisfies actual service conditions is determined, and it is easy to design and test. For the automotive lens, the focal length is 40 mm, the field of view is 8.6° , the entrance pupil diameter is 7 mm, the depth of field is 30 m~ $+\infty$, and the system total length is less than 38 mm. The simulation results show that the designed lens has good image quality and can meet the design requirements in actual use.

Key words optical design; automotive lens; distortion correction; target recognition of vehicles; pilotless automobile

OCIS codes 220.3620; 230.0040; 150.0155

1 引言

作为智能交通系统的重要组成部分,无人驾驶汽车是现阶段国内外研究的一个热点,其相关技术的开发也越来越受到人们的重视。作为无人驾驶汽车的关键技术之一,基于机器视觉的目标识别已经得到了越来越多的关注和应用,比如车道线识别、车型识别、交通标志识别等,其研究重点多侧重于算法的有效性^[1-3]。由于基于机器视觉的目标识别效果不仅依赖于相关算法的性能,而且在很大程度上也取决于车载镜头本身的成像质量^[4-6],因此根据识别对象的特点设计相应的光学镜头具有重要意义。

目前,专门用于车辆目标识别的车载镜头往往是针对近距离目标设计的,其视场角相对较大^[7]。这类镜

收稿日期: 2017-05-12; **收到修改稿日期:** 2017-05-22

作者简介: 张思远(1991—),男,硕士研究生,主要从事双目视觉方面的研究。E-mail: 1611986066@qq.com

导师简介: 谢 飞(1979—),男,博士,副教授,主要从事计算机视觉、目标识别与跟踪方面的研究。

E-mail: 178327019@qq.com

头虽然能够较好地对近距离车辆目标进行成像,但对较远的车辆目标成像效果较差,无法兼顾对中远距离车辆目标的识别准确率,降低了有效的目标识别范围,难以满足无人驾驶汽车在较高车速下行驶时对前方预瞄距离的要求。

为了弥补这一缺陷,本文设计了一款适合安装于乘用车上的中远距离车载镜头。将该镜头与视场角相对较大的车载镜头配合使用,不仅可以保证对近距离车辆目标的成像质量,而且可以大大提高对较远距离车辆目标的成像品质和识别准确率。

2 光学设计过程

2.1 镜头的使用要求

根据无人驾驶汽车上常用的其他传感器的探测范围和实际需要,要求所设计的光学镜头能够对前方 200 m 的车辆目标进行良好成像,并且在 200 m 处的水平视场宽度 y 要达到 24 m。与此同时,根据乘用车的外形尺寸,设定镜头的布置高度 H 在 1.4~1.8 m 范围内。

2.2 镜头光学设计参数的计算

2.2.1 镜头景深的确定

由前述使用要求和图 1(a)可知,镜头的水平视场角 ω_h 为

$$\omega_h = 2\arctan \frac{y}{2l} = \arctan \frac{24}{2 \times 200} \approx 6.87^\circ, \quad (1)$$

式中 l 为物距, y 为 l 处的水平视场宽度。

假设所选电荷耦合器件(CCD)焦平面探测器的宽高比为 4:3,则镜头的垂向视场角 ω_v 为

$$\omega_v = \omega_h \times \frac{3}{4} \approx 5.15^\circ. \quad (2)$$

因为只有当获得车辆的完整图像时,相关算法才能对车辆目标进行准确、高效的识别,所以由图 1(b)可知, L_v 是镜头有效识别距离的下限。因此,为了充分发挥所设计镜头的识别作用,应使其景深下限小于 L_v 的最小值。又因为在垂向视场角 ω_v 一定时, L_v 的大小仅取决于镜头的布置高度 H ,所以由前述使用要求可知, L_v 的最小值 $L_{v\min}$ 为

$$L_{v\min} = \frac{H_{\min}}{\tan(\omega_v/2)} = \frac{1.4}{\tan(5.15^\circ/2)} \approx 31.13 \text{ m}, \quad (3)$$

式中 H_{\min} 为镜头的最低布置高度。

综合考虑上述计算结果和使用要求,所设计镜头的景深应为 31.13~200 m。

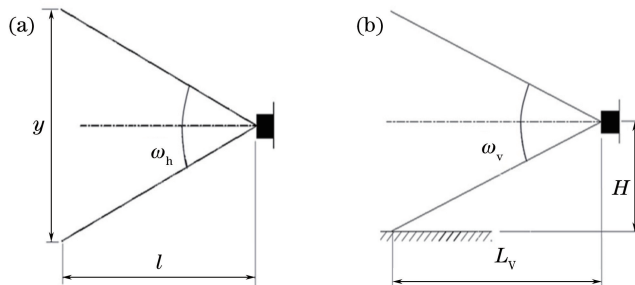


图 1 镜头的水平视场角和垂向视场角。(a)水平视场角;(b)垂向视场角

Fig. 1 Horizontal and vertical field angle of the lens. (a) Horizontal field angle; (b) vertical field angle

2.2.2 CCD 焦平面探测器的选取

为了满足对中远距离车辆目标的识别要求,需要根据最远有效识别距离处的拍摄截面大小、车辆横截面面积以及识别车辆目标所需的最小像素数来选择合适的 CCD 焦平面探测器,以进一步确定镜头的其他光学设计指标。

由图 1(b)可知,在镜头两侧没有障碍物遮挡的前提下,当垂向视场角 ω_v 一定时,镜头的布置高度越高,

所设定的最远有效识别距离处的拍摄截面面积 S 就越大。因此,根据使用要求中设定的镜头布置高度可知,最远有效识别距离(200 m)处的拍摄截面面积 S 的最大值 S_{\max} 为

$$S_{\max} = 24 \times \left(H_{\max} + 200 \times \tan \frac{\omega_v}{2} \right) = 24 \times \left(1.8 + 200 \times \tan \frac{5.15^\circ}{2} \right) = 259.1 \text{ m}^2, \quad (4)$$

式中 H_{\max} 为镜头的最大布置高度。

为了保证所设计镜头能够对横截面面积相对较小的车辆进行有效识别,根据公路上常见车辆的外形尺寸,将需要识别的车辆目标的横截面面积下限 S_{\min} 取为 2.24 m^2 。在充分考虑各种车辆识别算法的要求后,设定车辆横截面至少需要占有 $21 \text{ pixel} \times 21 \text{ pixel}$ 才能被有效识别出来。综上所述,CCD 焦平面探测器的总像素数 S_{pixel} 应为

$$S_{\text{pixel}} = \frac{S_{\max}}{S_{\min}} \times 21 \times 21 = \frac{259.1}{2.24} \times 21^2 \approx 53439 \text{ pixel}. \quad (5)$$

在保证无人驾驶汽车对数据实时性要求的前提下,为了尽可能地提高识别准确率,最终选择的 CCD 焦平面探测器的有效感光尺寸为 $4.8 \text{ mm} \times 3.6 \text{ mm}$,像元尺寸为 $4.65 \mu\text{m} \times 4.65 \mu\text{m}$ 。由此可知,其宽高比满足 2.2.1 节中的假设。

2.2.3 镜头的焦距和全视场角

由图 2 可知,所设计镜头的焦距 f' 为^[8]

$$f' = \frac{y' \times l}{y} = \frac{4.8 \times 200}{24} = 40 \text{ mm}, \quad (6)$$

式中 y' 为 CCD 焦平面探测器的水平宽度。

镜头的全视场角 ω 为

$$\omega = 2\arctan \frac{h}{2f'} = 2\arctan \frac{\sqrt{4.8^2 + 3.6^2}}{2 \times 40} \approx 8.6^\circ, \quad (7)$$

式中 h 为 CCD 焦平面探测器的对角线尺寸。

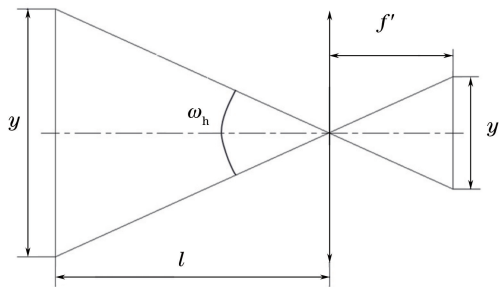


图 2 焦距计算示意图

Fig. 2 Schematic of focal length calculation

2.2.4 镜头的入瞳直径

设计主要依据以下两个原则来确定镜头的入瞳直径:一方面,实际需要的成像范围应在所设计镜头的景深范围内;另一方面,入瞳直径应尽量取大值以增大成像信噪比。

根据上述入瞳直径的选取原则,利用成像景深公式对所设计镜头的入瞳直径进行了计算。当成像系统设计要像元弥散斑直径小于 2×2 个像元大小时,其成像远景和近景到入射光瞳的距离 L_1 和 L_2 的表达式为^[9]

$$\begin{cases} L_1 = \frac{DL}{D-z} \\ L_2 = \frac{DL}{D+z} \end{cases}, \quad (8)$$

式中 L 是对准平面到入瞳的距离, z 为对准平面上弥散斑的允许值, D 是成像系统的入瞳直径。

对准平面上弥散斑的允许值 z 可由以下三式联立求得:

$$z = \frac{z'}{\beta}, \quad (9)$$

$$z' = 2d, \quad (10)$$

$$\beta = \frac{f'}{L}, \quad (11)$$

式中 z' 为像面上允许的弥散斑直径, β 是成像系统的放大率, d 为像元直径。

为了提高车载光学系统的可靠性,降低系统设计、装配、检验的复杂程度,将对准距离 L 取为无穷远。根据(8)~(11)式便可计算得到对准距离为无穷远时镜头景深与入瞳直径之间的关系,如表 1 所示。

综合考虑所设计镜头的景深、信噪比要求和适当余量的留取,最终选择的设计方案为对准距离无穷远,入瞳直径 D 为 7 mm。

表 1 景深与入瞳直径的关系

Table 1 Relationship between pupil diameter and depth of field

Pupil diameter /mm	Depth of field /m
7.5	32.258- $+\infty$
7.4	31.828- $+\infty$
7.3	31.398- $+\infty$
7.2	30.968- $+\infty$
7.1	30.538- $+\infty$
7.0	30.108- $+\infty$

2.2.5 镜头的分辨率要求

要想使设计的镜头与所选 CCD 焦平面探测器相匹配,镜头的分辨率必须满足:CCD 像素尺寸乘以镜头分辨率等于 $0.5^{[10]}$ 。经计算可知,该镜头的分辨率必须达到 110 lp/mm。

综合考虑上述计算结果和实际需要,最终确定的光学设计指标如表 2 所示,其中 MTF 表示调制传递函数。

表 2 镜头光学设计指标

Table 2 Specifications of the lens

Parameter	Value
Focal length /mm	40
Field of view /°	8.6
Pupil diameter /mm	7
Wavelength	Visible light
Maximum distortion /%	<0.2
Minimum depth of field /m	31.13-200
Pixel size /($\mu\text{m} \times \mu\text{m}$)	4.65×4.65
MTF	$>0.4(110 \text{ lp/mm}), >0.6(55 \text{ lp/mm})$

2.3 镜头初始结构的选取

镜头初始结构的获取有多种途径,其中最常用的是以下两种方法^[11]:一种是根据初级像差理论来计算初始结构;另一种是根据已经公开发表的镜头设计专利,选取一个光学特性类似的镜头,通过焦距缩放作为初始结构。为了提高设计效率,避免过于繁琐的理论计算,研究采用第二种方法获取镜头的初始结构。

首先,确定镜头的结构型式。对于中远距离光学系统,其视场角相对较小,随着焦距的增大,镜头的球差和二级光谱都会有所增加,因此,所选结构要能够校正二级光谱等像差。另外,考虑到车载镜头的工作环境和有限的布置空间,所选结构应能缩短镜筒长度,缩小系统体积。综合考虑所设计镜头的特点和实际应用需要,最终采用了摄远型物镜结构。这种结构的主要优点在于^[12]:1) 系统的总长度小于焦距,有利于减轻车身振动对镜头性能的影响;2) 因为其具有正透镜组和负透镜组,所以能够较好地校正球差、彗差、场曲以及像散,基本上可以满足所设计镜头对像差校正的需要;3) 摄远型物镜不仅视场角可达 $15^\circ \sim 20^\circ$,而且可以通过采用复杂的前组结构,使其具有较大的相对孔径,以满足所设计镜头的要求。

然后,在确定的结构型式中,寻找各项参数接近设计要求的镜头。根据确定的光学特性参数,在LensVIEW镜头专利数据库中选择了一款摄远物镜作为所设计镜头的初始结构,其焦距 $f' = 100$ mm, F 数为6.8,全视场角 $\omega = 8.66^\circ$,具体结构如图3(a)所示。从图3(a)可以看出,所选摄远型物镜的前组采用二组三片式结构,承担了较大的光焦度,可以获得较大的相对孔径;后组采用二组二片式结构,承担了较小的光焦度,有利于校正畸变。由于该镜头的各个技术指标并不完全符合所设计镜头的光学特性参数,因此在进行优化操作之前,需要先利用光学设计软件ZEMAX-EE对其进行结构参数的缩放设计,使其焦距 $f' = 40$ mm,入瞳直径 $D = 7$ mm,全视场角 $\omega = 8.6^\circ$,缩放后得到的镜头结构如图3(b)所示。

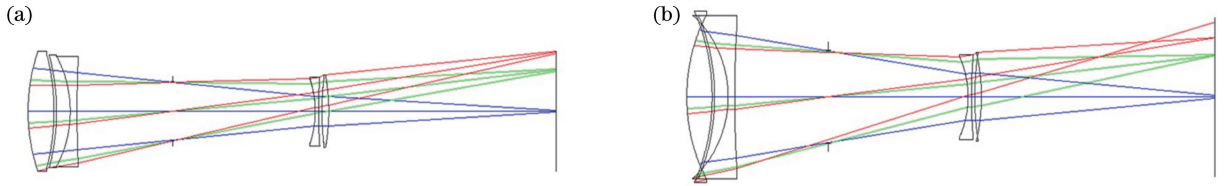


图3 缩放前后的镜头结构。(a)缩放前;(b)缩放后

Fig. 3 Structure of the lens before and after zooming. (a) Before zooming; (b) after zooming

2.4 优化过程与结果

由图3(b)可以看出,经过缩放设计后,镜头的结构中出现了违反边界条件的情况,这可能是因为有些光线与某些折射面没有交点造成的^[13]。因部分镜片的厚度太薄,直接进行优化难以得到理想的设计结果。所以,研究先通过缩小镜头相对孔径和增加镜片厚度的方式进行预优化。

首先,将镜头的入瞳直径缩小至5.5 mm,以消除镜头结构中出现的违反边界条件的情况;然后,取各透镜的曲率半径为变量,在ZEMAX-EE软件提供的默认评价函数的基础上,加入焦距、位置色差等限制参数进行一次优化;最后,通过“微量多次”的方式增加透镜厚度,即每次将透镜厚度增加0.1 mm,并立即使用与前述相同的评价函数进行一次优化,不断进行这种“增加厚度—优化”的循环,直到透镜厚度达到要求,预优化阶段结束。

预优化完成后,将镜头的入瞳直径重新修正为7 mm。此时,镜头的结构中已经不存在违反边界条件的情况。然后,在预优化阶段所用评价函数的基础上,将透镜的厚度和光阑前后的两个空气间隔设置为变量,并加入镜头结构边界限制条件和像差限制参数进行再次优化。

通过反复校正和优化后,最终得到的镜头结构参数如表3所示,其光路图如图4所示。

表3 最终的镜头结构参数

Table 3 Final structure parameters of the lens

Surface	Surface type	Radius /mm	Thickness /mm
1	Standard	9.966	2.162
2	Standard	-16.525	0.15
3	Standard	-15.577	1.63
4	Standard	-6.35	0.911
5	Standard	65.143	4.101
Stop		Infinity	9.858
7	Standard	-5.849	1.111
8	Standard	-8.202	0.2
9	Standard	10.554	1.457
10	Standard	12.971	15.849
Image		Infinity	-

3 镜头像质评价

为了反映所设计镜头的成像质量,研究分别采用MTF、畸变和能量集中度进行像质评价。镜头的MTF曲线如图5(a)所示,各个视场的MTF值均接近衍射极限;曲线与坐标轴围成的面积较大,表明该镜头成像

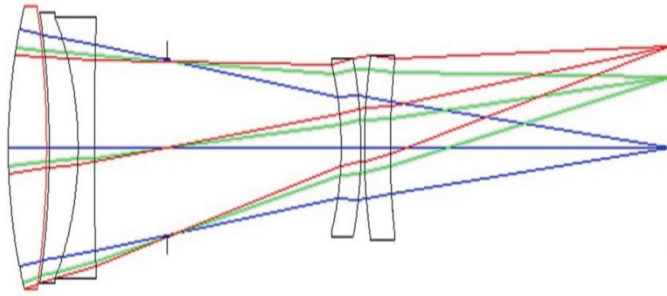


图4 最终镜头结构

Fig. 4 Final structure of the lens

清晰度较高;曲线比较集中,表明该镜头各视场成像质量均匀;弧矢曲线与子午曲线接近,表明该镜头像散小^[14];在 110 lp/mm 处,所有视场的 MTF 曲线高度均在 0.4 以上;在 55 lp/mm 处,所有视场的 MTF 曲线高度均在 0.7 以上,满足设计要求。镜头的畸变曲线如图 5(b)所示,最大畸变值约为 0.18%,满足设计要求。镜头的衍射能量集中度曲线如图 5(c)所示,各个视场的曲线均接近衍射极限,目标能量的 80% 以上均在 0.25 μm 内。

综上所述,镜头的设计结果符合指标要求,成像质量接近衍射极限,畸变小,能够满足实际使用需要。

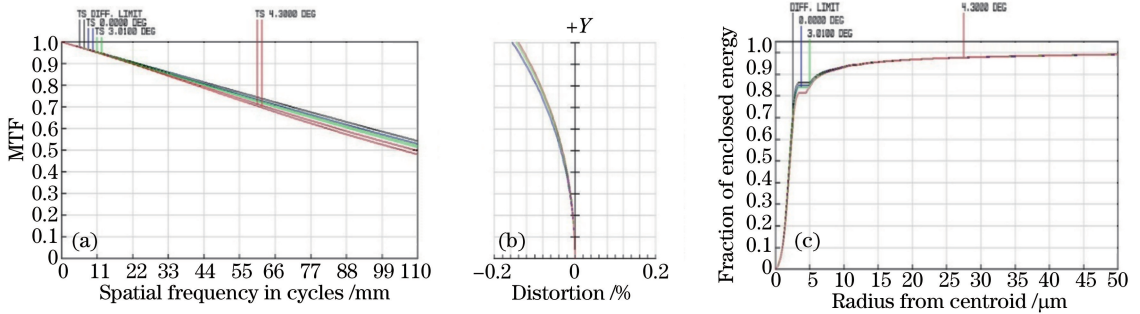


图5 镜头的像质评价。(a) MTF 曲线;(b)畸变曲线;(c)衍射能量集中度曲线

Fig. 5 Image quality evaluation of the lens. (a) MTF curves; (b) distortion curves; (c) concentration curves of diffractive energy

4 结 论

为了提高对中远距离车辆目标的成像质量和识别准确率,满足无人驾驶汽车对前方预瞄距离的要求,研究和设计了一款适合安装于乘用车上的中远距离车载镜头。首先,根据乘用车的特点和应用需要,确定了镜头的使用要求,并详细说明了其光学设计指标的计算过程;然后,根据设计指标选取了镜头的初始结构,并利用 ZEMAX-EE 软件进行了优化;最后,根据优化结果,对镜头的成像质量进行了评价。所设计的车载镜头焦距为 40 mm,视场角为 8.6° ,入瞳直径为 7 mm,景深为 $30\text{ m} \sim +\infty$,系统总长小于 38 mm,各项指标均满足设计要求。设计的车载镜头具有较好的成像质量,能够满足实际使用需要。将该镜头与视场角相对较大的车载镜头配合使用,不仅可以保证对近距离车辆目标的成像质量,而且可以大大提高对中远距离车辆目标的成像品质和识别准确率。

参 考 文 献

- [1] Wang Wenfeng, Ding Weili, Li Yong, *et al.* An efficient road detection algorithm based on parallel edges[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(7): 0715001.
王文锋, 丁伟利, 李勇, 等. 一种高效的基于平行边缘的道路识别算法[J]. 光学学报, 2015, 35(7): 0715001.
- [2] Li Chengfei, Chen Xinhua. Vehicle type recognition based on combining local binary pattern and Hu matrix feature[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(10): 101503.
李澄非, 陈新华. 融合局部二值模式和 Hu 矩特征的车辆识别[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(10): 101503.

- [3] Wang Qilong, Li Jianyong, Shen Haikuo. Target tracking system of binocular vision and laser range sensor[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(9): 0912002.
王琪龙, 李建勇, 沈海阔. 双目视觉-激光测距传感器目标跟踪系统[J]. *光学学报*, 2016, 36(9): 0912002.
- [4] Li Kaiming, Zhang Qun, Luo Ying, *et al.* Review of ground vehicles recognition[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2014, 42(3): 538-546.
李开明, 张群, 罗迎, 等. 地面车辆目标识别研究综述[J]. *电子学报*, 2014, 42(3): 538-546.
- [5] Qiao Jian. Analysis on detection ability of shipborne optic-electronic equipment[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 21(10): 2520-2526.
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.
- [6] Bertozzi M, Broggi A, Fascioli A. Vision-based intelligent vehicles: State of the art and perspectives[J]. *Journal of Robotics and Autonomous Systems*, 2000, 32(1): 1-16.
- [7] Liu X H. Development of a vision-based object detection and recognition system for intelligent vehicles[D]. Madison: The University of Wisconsin, 2000: 14-69.
- [8] Zhang Shanhu, Chen Huifang, Zhang Haiting, *et al.* Design of optical lens for traffic surveillance system[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, 48(2): 022202.
张善华, 陈慧芳, 张海艇, 等. 用于交通监控系统的光学成像镜头的设计[J]. *激光与光电子学进展*, 2011, 48(2): 022202.
- [9] Yu Daoyin, Tan Hengying. *Engineering optics*[M]. Beijing: China Machine Press, 2000: 58-63.
郁道银, 谈恒英. *工程光学*[M]. 北京: 机械工业出版社, 2000: 58-63.
- [10] Song Jiajun, He Ping'an. Design of zoom projection lens for the light engine of LCoS rear-projection TV[J]. *Applied Optics*, 2007, 28(1): 58-62.
宋家军, 何平安. LCoS 背投光学引擎中变焦投影物镜设计[J]. *应用光学*, 2007, 28(1): 58-62.
- [11] Zhang Yimo. *Applied optics*[M]. Beijing: China Machine Press, 2008: 602-658.
张以谟. *应用光学*[M]. 北京: 机械工业出版社, 2008: 602-658.
- [12] Huang Zhenyong, Lu Chunlian, Yu Jianjie. *Optical design tutorials based on ZEMAX software*[M]. Harbin: Harbin Engineering University Press, 2013: 335-337.
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: 335-337.
- [13] Mao Wenwei. *Modern optical lens design: methods and examples*[M]. Beijing: China Machine Press, 2013: 280-284.
毛文炜. *现代光学镜头设计方法与实例*[M]. 北京: 机械工业出版社, 2013: 280-284.
- [14] Zhang Baolong, Li Dan, Zhang Shaojing, *et al.* Design of aspheric fisheye lens and study of distortion correction algorithms[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(12): 1222001.
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.