

基于 Placido 盘的角膜地形图仪成像系统设计与实现

隋成华¹ 沃圣杰¹ 高楠² 徐丹阳¹ 韩勇浩¹ 杜春年¹

¹浙江工业大学理学院, 浙江 杭州 310023

²浙江工业大学计算机学院, 浙江 杭州 310023

摘要 为实现基于 Placido 盘的角膜地形图仪中图像的有效采集,根据人眼角膜的特点以及所选用的 CCD 面阵参数,设计了一套对称式消色差物镜及准直照明透镜系统。利用初级像差理论及 PW 法计算成像镜头的初始结构,根据近轴光线追迹公式计算准直照明透镜参数,利用 Zemax 光学软件进行系统优化。成像镜头结构由 2 组 4 片镜片组成,有效焦距为 20 mm,后工作距离为 19.2 mm,相对孔径为 1/3,全视场角为 8°,光学总长控制在 20 mm 以内。在镜头分辨率 66 lp·mm⁻¹处,所有视场的调制传递函数值均大于 0.3,全视场畸变量小于 0.5%。该系统具有整体结构简单、紧凑、易加工、成本低、成像质量好等特点,其性能很好地满足了整机的要求。

关键词 光学设计; 对称式消色差物镜; 像差理论; 角膜地形图仪

中图分类号 O435.2 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201636.1222001

Design and Implementation of Imaging System for Corneal Topography Based on Placido Disk

Sui Chenghua¹ Wo Shengjie¹ Gao Nan² Xu Danyang¹ Han Yonghao¹ Du Chunnian¹

¹ College of Science, Zhejiang University of Technology, Hangzhou, Zhejiang 310023, China

² College of Computer, Zhejiang University of Technology, Hangzhou, Zhejiang 310023, China

Abstract In order to collect images effectively with a corneal topography based on the Placido disk, a system with a symmetrical achromatic lens and a collimating illumination lens is designed according to characteristics of human corneal and CCD plane array parameters. The initial structure of the imaging lens is calculated based on the theory of primary aberration and the PW method. The collimating illumination lens parameters is designed by paraxial ray trace equations. The imaging system is optimized with the Zemax software. The imaging lens structure is composed of four lenses in two groups, its effective focal length is 20 mm, back working distance is 19.2 mm, full field of view is 8°, relative aperture is 1/3, and maximum optical total track is 20 mm. The modulation transfer function in all fields is larger than 0.3 at resolution of 66 lp·mm⁻¹ and the full field-of-view distortion is less than 0.5%. The system is characterized by its simplicity, compactness, easy processing, low cost and high imaging quality, which meets the requirements of the whole system very well.

Key words optical design; symmetrical achromatic lens; aberration theory; corneal topography

OCIS codes 220.2945; 220.3620; 110.2945

1 引 言

近十几年来,为了满足角膜表面病变如圆锥角膜、边缘角膜变性等疾病的精确诊断,角膜塑形镜验配,以及角膜屈光手术的需求,针对角膜表面形貌检测的方法越来越多。目前市场上存在多种基于不同测量方法的角膜地形图仪产品,常用的测量方法有 Placido 盘法、立体三角光栅网格投影法、光学层析相干成像法、角膜曲率仪法等,其中 Placido 盘法的使用最为广泛。基于 Placido 盘的角膜地形图仪作为现代眼科医学检测中重要的测量仪器,能将角膜表面形貌通过数据或图像予以精确地展示,为眼科医生测量角膜表面形貌及之

收稿日期: 2016-06-27; **收到修改稿日期:** 2016-07-14

基金项目: 浙江省重大科技专项(2011C11048)

作者简介: 隋成华(1956—),男,博士,教授,主要从事新型光电信息处理系统的开发及应用方面的研究。

E-mail: suich@zjut.edu.cn

后的角膜屈光矫正提供了有力的检测手段^[1-6]。

目前基于 Placido 盘的角膜地形图仪对角膜的检测方式主要是通过投射照明系统将 Placido 盘上的黑白条纹投射到角膜表面,经角膜反射后,通过成像系统成像到 CCD 面阵上。由于成像系统属于角膜地形图仪的核心部件,且部分整机厂家委托专业公司进行设计制造,因此其设计未见详细报道。

本文提出了基于 Placido 盘的角膜地形图仪成像系统的设计方法。首先根据系统参数,确定其为小视场、小相对孔径及短焦距类型,决定采用对称式消色差透镜;利用像差理论及薄透镜组的像差特性参数(PW)法得到 4 组初始结构,确定其中像差最小的一组;最后利用 Zemax 软件对其进行优化,完成成像系统的设计。为了方便成像镜头与被测眼睛实现中心对准,还设计了附加的准直照明透镜系统;为了减少体积,采用一正一负摄远型镜头。在选用 K9 玻璃的情况下,采用近轴光线追迹法(PRTE)对其初始结构进行求解,利用 Zemax 软件进行优化,完成设计。整体系统具有结构简单,体积小,易加工,成本低等特点,其性能很好地满足了角膜地形图仪的工作需要。

2 设计思路与原理

图 1 所示为用于观测角膜表面形貌的基于 Placido 盘的角膜地形图仪光学系统的工作原理。投射照明系统发出均匀的光,经 Placido 盘后将盘上的黑白条纹投影到角膜表面,经角膜反射后,再通过成像系统成像在 CCD 面阵上,分析图像上同心环的变形程度,可求得不同位置角膜曲率的变化,从而进一步分析角膜各处的屈光度,类似于地形图学上的等高线法。

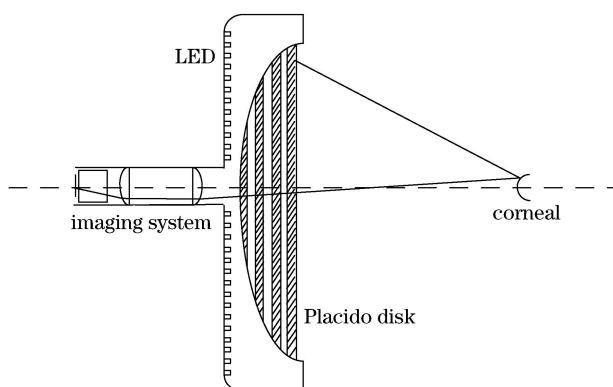


图 1 角膜地形图仪结构示意图

Fig. 1 Structure schematic of corneal topography

一般亚洲成年人的角膜水平径约 11 mm,垂直径约 10 mm,平均曲率半径为 7.8 mm,角膜表面测量所需覆盖的范围为水平径 9.3 mm 以内,因此工作距离不能太长也不能过短。设计中选取的工作距离为 75 mm,能保证测量范围在 9.3 mm 以内^[7]。成像系统的孔径光阑与 Placido 盘中心小孔大小相同,其直径为 6.5 mm,因此成像系统是个小视场、小相对孔径的光学系统,在设计中选择传统的对称式消色差物镜。为获得良好的成像效果,一般要求镜头具有衍射受限的性能。角膜地形图仪的照明光源采用红色 AlGaInP LED 灯,工作波长为 600,625,640 nm,其中 625 nm 为主波长。

3 成像系统设计

3.1 成像系统参数要求

采用 SONY 公司 ICX424AL 型 CCD 面阵,其感光面有效尺寸为 4.8 mm×3.6 mm,有效分辨率为 659 pixel×494 pixel,像元大小为 7.4 μm×7.4 μm,由此可计算得到光学系统的相关参数(表 1)。

1) 对角线长度即像高为

$$h = \sqrt{4.8^2 + 3.6^2} = 6 \text{ mm}。 \quad (1)$$

2) 根据奈奎斯特定律,该系统的截止频率为

$$f_c = \frac{1}{2s} \times 1000 = \frac{1}{2 \times 7.4} \times 1000 = 67.6 \text{ lp} \cdot \text{mm}^{-1}, \quad (2)$$

式中 f_c 为截止频率, s 为单像素尺寸。

通常一款镜头的调制传递函数(MTF)值的高频表示画面细节,中频表示画面层次,低频表示画面轮廓。在半视场角为 4° 的情况下,为了使图像边缘达到较高的锐利度,对高频和中频有所要求:MTF 值在中频 $33 \text{ lp}\cdot\text{mm}^{-1}$ 处高于 0.5,在高频 $67 \text{ lp}\cdot\text{mm}^{-1}$ 处大于 0.3,尽量接近衍射极限^[8]。

表 1 光学系统设计参数

Table 1 Optical system design parameters

Parameter	Value
Working distance /mm	75
Focall ength /mm	20
Image height /mm	3
Resolution /($\text{lp}\cdot\text{mm}^{-1}$)	67
Aperture /mm	6.5
Object height h /mm	6

3.2 初始结构的选取

设计的角膜地形图仪成像系统为小视场、小相对孔径的光学系统。而对称式消色差物镜适用于焦距比较短,视场角比较小,相对孔径小的系统,因此只要使两个双胶合组分别消色差,整个透镜组便可以同时校正轴向色差和垂轴色差,利用两个透镜组的弯曲可以校正球差及彗差。

为简单起见,将两个双胶合组看作一个密接薄透镜组,根据薄透镜组合焦距原理及对称性,得

$$\begin{cases} \phi_1 + \phi_2 = \phi \\ \phi_1 = \phi_2 \end{cases}, \quad (3)$$

式中 ϕ_1 为正透镜光焦度, ϕ_2 为负透镜光焦度, ϕ 为组合透镜组光焦度。由(3)式解得

$$\phi_1 = \phi_2 = 0.025. \quad (4)$$

根据薄透镜的初级像差理论及 PW 求解方法,可将初级球差 S_1 , 彗差 S_2 , 像散 S_3 及轴向色差 S_{1c} 等像差系数表示为^[9-10]

$$\begin{cases} S_1 = f_1(\phi_1, \phi_2, Q_1, Q_2) \\ S_2 = f_2(\phi_1, \phi_2, Q_1, Q_2) \\ S_3 = f_3(\phi_1, \phi_2, Q_1, Q_2) \\ S_{1c} = f_{1c}(\phi_1, \phi_2, Q_1, Q_2) \end{cases}, \quad (5)$$

式中 Q_1, Q_2 为两双胶合透镜的形状因子,可用来校正初级像差。联立(5)式中的任意两个方程组求解 Q_1 和 Q_2 值。由于推导过程冗杂,且前后双胶合组存在对称性,在此只给出选用常用玻璃组合的前组结果,如表 2 所示,其中 r_1, r_2 分别为透镜前表面曲率半径及后表面曲率半径。比较可见,第 4 组的像差系数值最小,选择该组作为进一步优化设计的初始结构^[11]。

表 2 初始结构参数

Table 2 Initial structure parameters

Initial solution	Glass combination	Q_1	r_1	r_2	r_3	S_1	S_2	S_{1c}
1	K9-ZF2	0.05	63.54	19.76	-27.62	0.020	-0.131	0.030
2	K9-F2	-0.07	-339.77	-11.83	-24.50	-0.033	-0.094	-0.095
3	K10-F2	-0.08	45.12	-11.51	-22.57	-0.016	0.033	-0.026
4	K7-F2	-0.15	45.24	-13.02	-37.96	0.011	-0.019	-0.001

3.3 系统优化设计及结果

计算初始结构时略去了透镜的厚度,是一个近似解,需经过优化才能得到符合实际要求的光学系统。在初始结构已经确定,基本结构满足的条件下,对系统进行进一步优化。在对称式消色差物镜视场小,相对孔径不大的情况下,应保证其轴上点及近轴部分有良好的成像质量,所以在校正像差时,一般不考虑高级像差,而着重考虑球差、彗差、轴向色差和垂轴色差。利用 Zemax 软件,加入适当的透镜厚度,建立合理的评价函数,更换玻璃的材质,设置合理的约束条件进行优化。

经过一系列优化之后,最后得到的结果如图 2 所示,玻璃组合改为 H-QK3L 与 H-ZLAF52,焦距为 20.01 mm,后工作距离为 19.20 mm,筒长 17.84 mm,像高 2.81 mm,系统结构简单紧凑,成像质量良好。



图 2 优化设计得到的镜头

Fig. 2 Lens obtained from optimization

图 3 所示为理论计算所得 MTF 曲线。从图 3 可看出,MTF 值在中频 33.5 lp·mm⁻¹时大于 0.5,在高频 67 lp·mm⁻¹,即 CCD 截止频率时,全视场与近轴视场 MTF 值均约为 0.3,有较好的成像质量。

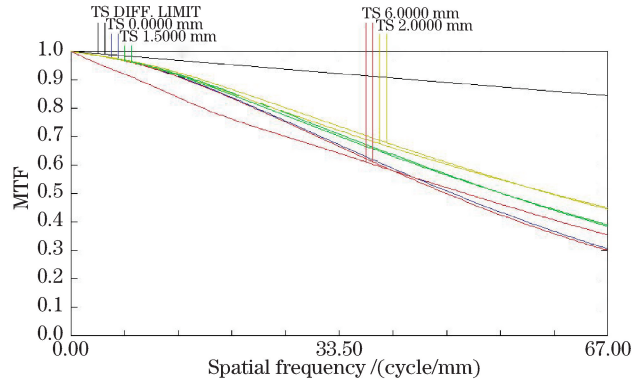


图 3 MTF 曲线图

Fig. 3 MTF curves

图 4 所示为系统的场曲与畸变图。从图中可以看出,场曲在全视场下为 0.1 mm,最大畸变不超过 0.5%。

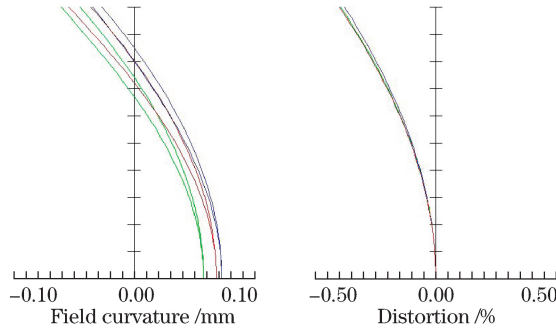


图 4 场曲及畸变

Fig. 4 Field curvature and distortion

通过观察点列图(图 5)分析弥散斑的均方根(RMS)大小,结果如表 3 所示。

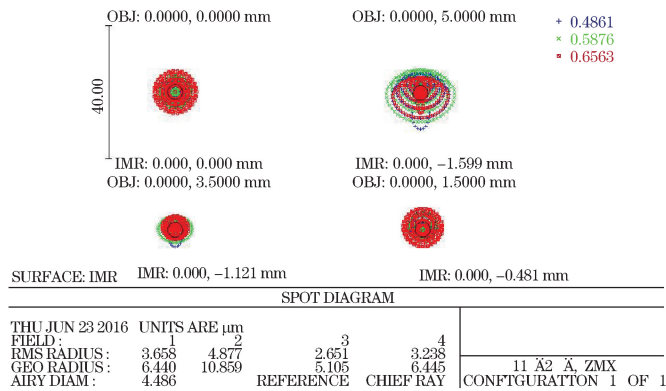


图 5 点列图

Fig. 5 Spot diagram

表 3 各视场光斑均方根

Table 3 RMS of spot size in different relative fields

Relative field	RMS / μm	CCD pixel size / μm
0	3.658	
0.3	3.238	7.74
0.7	2.651	
1.0	4.877	

各个视场的均方根弥散斑均小于提供的 CCD 像元尺寸 $7.74 \mu\text{m}$, 尺寸接近于艾里斑, 说明系统有较高的分辨率, 可保证成像清晰。

4 准直照明透镜系统设计

为方便成像镜头与被测眼睛实现中心对准, 在成像镜头后加入一片半反镜, 中心刻有十字线, 并采用单颗 LED 灯作为准直照明光源进行照明。为减小系统体积, 采用一正一负的摄远型结构。将光源置于透镜系统焦距处, 光线经系统后准直出射照亮位于半反镜上的十字线。由于准直照明系统视场较小, 且透镜厚度较焦距来说可忽略不计, 因此可看作薄透镜系统。为方便起见, 采用反向设计的方法, 因不必专门考虑像差等因素, 玻璃材料可选用常用的 K9。如图 6 所示, 平行入射光线经一正一负薄透镜后, 聚焦于一点, 根据近轴光线追迹公式^[12], 有

$$n'u' = nu - y\phi, \quad (6)$$

$$y_{j+1} = y_j + u'd, \quad (7)$$

式中 u 为物空间光线与光轴之间的夹角, u' 为像空间光线与光轴之间的夹角, y 为光线交于透镜的高度, d 为两透镜之间距离, n, n' 分别为物空间及像空间的介质折射率, 该设计中介质均为空气, 因此 $n = n' = 1$ 。根据(6)、(7)式可得

$$\begin{cases} y_2 = y_1 + u'_1 d_1, \\ u'_1 = u_1 - y_1 \phi_1, \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{cases} y_3 = y_2 + u'_2 d_2, \\ u'_2 = u_2 - y_2 \phi_2, \end{cases} \quad (9)$$

且

$$\phi_1 + \phi_2 - d_1 \phi_1 \phi_2 = \phi. \quad (10)$$

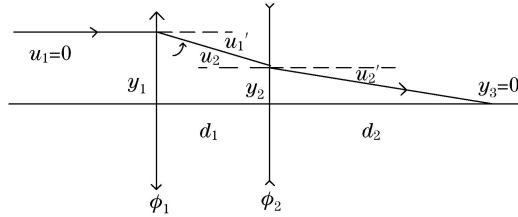


图 6 近轴准直照明系统

Fig. 6 Paraxial collimating illumination system

根据已知的 $y_1, y_2, u_1, d_1, d_2, \phi$ 可解得 ϕ_1 及 ϕ_2 , 同时设正透镜朝光源的表面曲率半径为 r_1^+ , 背向光源的表面曲率半径为 r_2^+ , 同理, 负透镜两个表面的曲率半径分别为 r_1^-, r_2^- 。为了便于加工, 将正负透镜朝光源的两个曲面取为平面(即 $r_1^+ = r_1^- = \infty$), 再根据

$$\phi = (n-1) \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right), \quad (11)$$

可求得正负透镜另外一面的曲率半径 r_2^+, r_2^- , 将计算得出的初始结构在 Zemax 中进行优化, 得到准直透镜系统具体参数, 如表 4 所示。

表 4 准直照明系统参数

Table 4 Specific parameters of collimating illumination system

Radius /mm	Material	Thickness /mm
Infinity	K9	2.0
11.56		4.0
Infinity	K9	2.0
-7.56		10.0

5 实验结果与分析

将设计的成像镜头与准直照明镜头进行加工装配,如图 7 所示,图中 a 为准直照明镜头部分,b 为成像镜头部分。

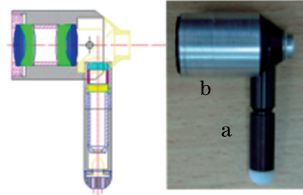


图 7 整体成像镜头

Fig. 7 Whole imaging lens

采用德国 Trioptics 公司 ImageMaster® Universal 光学镜头特性测量仪对加工完成的镜头进行测量,测得的 MTF 特性曲线如图 8 所示,图中 s 代表弧矢面,t 代表子午面。近轴视场及全视场 MTF 曲线在中频部分大于 0.5,在高频部分近轴视场大于 0.3,全视场接近于 0.3,这与仿真计算结果一致,证明了设计与制造的成像系统成像效果良好。

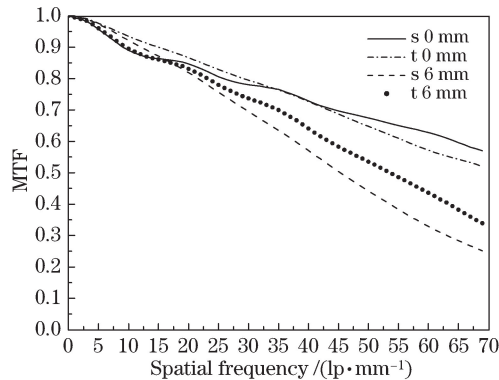


图 8 实测 MTF 曲线

Fig. 8 Measured MTF curves

将该成像系统装配于图 9 所示的整机系统上,调调整机中的对准调节机构,将十字线对准角膜中心,并进行调焦,获得图 10、11 所示实际拍摄效果。从图中可以看到,经模拟眼和人眼表面反射后 Placido 盘在 CCD 面阵上所成的黑白条纹图像清晰,边缘界限锐利,达到了良好的成像质量要求。



图 9 整机系统

Fig. 9 Whole system



图 10 模拟眼拍摄效果

Fig. 10 Shooting effect of model eye

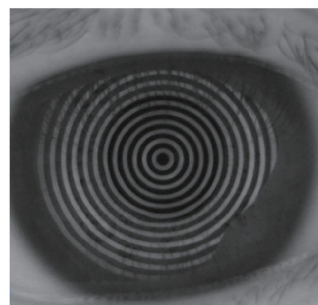


图 11 人眼拍摄效果

Fig. 11 Shooting effect of human eye

6 结 论

根据基于 Placido 盘的角膜地形图仪的结构及工作原理,对其成像系统中的成像镜头及准直照明镜头进行了设计。根据系统参数,确定其具有小视场、小相对孔径及短焦距等特点,利用初级像差理论及 PW 法计算了成像镜头的初始结构,选择其中像差最小的一组;根据近轴光线追迹公式计算准直照明透镜参数,利用 Zemax 光学软件进行了系统优化,并完成实际制作。实测 MTF 特性曲线表明,成像镜头在中高频都具有良好的分辨率。实验结果表明,经模拟眼表面及人眼角膜表面反射后 Placido 盘在 CCD 面阵上所成的黑白条纹图像清晰,边缘界限锐利,达到了良好的成像质量要求。同时该系统具有整体结构简单,体积小,易加工,成本低等特点,其性能很好地满足了整机的要求。

参 考 文 献

- 1 Karnowski K, Kaluzny B J, Szkulmowski M, *et al.* Corneal topography with high-speed swept source OCT in clinical examination[J]. *Biomedical Optics Express*, 2011, 2(9): 2709-2720.
- 2 刘祖国. 角膜地形图学[M]. 广州: 广东科技出版社, 2001: 8-13.
- 3 Liu Ming, Wang Zhaoqi, Wang Yan, *et al.* Aberrations compensation of corneal and crystalline lens based on individual eye model[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 28(10): 1977-1982.
刘 铭, 王肇圻, 王 雁, 等. 基于个体眼光学机构的角膜与晶状体的像差补偿[J]. *光学学报*, 2008, 28(10): 1977-1982.
- 4 Li Rui, Wang Zhaoqi, Liu Yongji, *et al.* Design of corneal contact lens by wavefront technology[J]. *Chinese J Lasers*, 2011, 38(s1): s116001.
李 蕊, 王肇圻, 刘永基, 等. 波前角膜接触镜的设计[J]. *中国激光*, 2011, 38(s1): s116001.
- 5 Zheng Shaolin, Liu Yongji, Wang Zhaoqi, *et al.* Design of optical system for a novel imaging keratometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(5): 0522004.
郑少林, 刘永基, 王肇圻, 等. 新型成像角膜曲率仪的光学系统设计[J]. *光学学报*, 2013, 33(5): 0522004.
- 6 Choi J A, Kim M S. Progression of keratoconus by longitudinal assessment with corneal topography[J]. *IOVS*, 2012, 53(2): 927-935.
- 7 Yang Jinsheng, Rao Xuejun, Rao Changhui. A corneal topography based on Hartmann-Shack sensor[J]. *Chinese J Lasers*, 2010, 37(3): 826-831.
杨金生, 饶学军, 饶长辉. 基于哈特曼-夏克传感器的角膜地形图仪[J]. *中国激光*, 2010, 37(3): 826-831.
- 8 Li Qi, Xiang Yang, Gu Junda, *et al.* Optical design of "cell factory" microscopic monitoring device[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(10): 1016002.
李 琦, 向 阳, 谷俊达, 等. "细胞工厂"显微监测装置的光学设计[J]. *中国激光*, 2014, 41(10): 1016002.
- 9 Yuan Xucang. Optical design[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1988: 117-125.
袁旭沧. 光学设计[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1988: 117-125.
- 10 Yuan Xucang. Applied optics[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1988: 166-180.
袁旭沧. 应用光学[M]. 北京: 国防工业出版社, 1988: 166-180.
- 11 Ji Yiqun, Shen Weimin. Optical design of large working area F-theta lens[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, 25(11): 1539-1542.
季轶群, 沈为民. 大工作面 F-theta 镜头的光学设计[J]. *光学学报*, 2005, 25(11): 1539-1542.
- 12 Geary J M. Introduction to lens design with practical Zemax examples[M]. Richmond: Willmann-Bell, 2002: 50-55.