

基于 Q-type 非球面的电子内窥镜物镜光学系统设计

李 闯, 薛常喜, 杨红芳, 张 然

长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022

摘要 采用具有“负-正”形式的反远距结构作为初始结构,利用 Q-type 非球面设计了一款工作在可见光波段的电子内窥镜物镜(EEO)光学系统,其全视场为 110° ,焦距为 1 mm, F 数为 3.3,最大通光孔径为 3 mm,系统总长为 7.89 mm。该光学系统由 6 片透镜组成,包括两组双胶合透镜和一片两面均为 Q-type 非球面的镜片。设计结果表明,在奈奎斯特空间频率 143 lp/mm 处的调制传递函数(MTF)高于 0.4,接近衍射极限。为验证 Q-type 非球面在 EEO 系统设计中的优越性,在相同计算平台与结构参数下设计了一款包含幂级数(PS)非球面的 EEO 系统,对两者进行了分析比较。结果表明,Q-type 非球面具有更强的系统像差校正能力,且有利于提高系统的优化设计效率;设计得到的 Q-type 非球面与其最接近球面之间的偏离量非常小,有利于提高非球面光学元件的加工效率与检测精度,降低成本;同时 Q-type 非球面 EEO 系统的装配敏感性更低,有利于提高系统的装配效率。

关键词 光学设计;内窥镜光学系统;Q-type 非球面;非球面加工;装配敏感性

中图分类号 O439; R318.6 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201737.0622001

Optical System Design of Electronic Endoscope Objective with Q-type Aspheres

Li Chuang, Xue Changxi, Yang Hongfang, Zhang Ran

School of Optoelectronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China

Abstract By using the retrofocus structure with a “negative-positive” form as the initial structure, we design an electronic endoscope objective (EEO) optical system with Q-type aspheres working in the visible light band, whose total field of view is 110° , focal length is 1 mm, F number is 3.3, maximum clear aperture is 3 mm, and total length is 7.89 mm. The optical system is composed of six pieces of lenses, including two cemented doublet and one lens with Q-type aspheres of both sides. The design results show that the modulation transfer function (MTF) values are higher than 0.4 at Nyquist spatial frequency of 143 lp/mm, which is approaching the diffraction limit. For validating superiority of Q-type aspheres in EEO system design, an EEO system is designed with power series (PS) aspheres in the same computing platform and with the same structure parameters. The comparison results show that Q-type aspheres have stronger ability to correct the aberration of the system, and they are helpful to improve the efficiency of system optimization. The aspheric departure between the designed Q-type aspheres and their closest spheres is very little, which is beneficial to enhance the detection precision and working efficiency of aspheric optical components, and the cost can be reduced. The designed EEO system with Q-type aspheres has lower assembly sensitivity, which helps to improve the system assembly efficiency.

Key words optical design; endoscope optical system; Q-type aspheres; aspheric fabrication; assembly sensitivity

OCIS codes 220.2740; 080.4225; 220.1250; 220.4610

收稿日期: 2016-11-21; 收到修改稿日期: 2017-01-02

基金项目: 国家自然科学基金(61108044)、吉林省自然科学基金(20150101062JC)、长春理工大学科技创新基金(XJLJG201616)

作者简介: 李 闯(1991—),男,硕士研究生,主要从事成像光学系统设计方面的研究。E-mail: lichuang_2012@sina.com

导师简介: 薛常喜(1979—),男,副教授,博士生导师,主要从事衍射光学、光学设计与超精密光学加工方面的研究。

E-mail: xcx272479@sina.com(通信联系人)

1 引 言

内窥镜一般由光源、小口径镜头组、可弯曲部分及传感器组成。随着精密制造及信号处理技术的发展,内窥镜经历了从硬性内窥镜^[1]到纤维内窥镜^[2],再到电子内窥镜^[3]的快速变革。相比于硬性内窥镜和纤维内窥镜,电子内窥镜具有使用方便、可实时观察和成像分辨率高等优点,在医疗诊断和微创手术中有十分重要的应用^[4-5]。观察范围的大小、成像质量的好坏以及系统结构的紧凑程度直接影响电子内窥镜的使用效果,也标志着电子内窥镜技术的发展水平,因此,电子内窥镜物镜(EEO)光学系统的设计尤为重要。国内外关于 EEO 系统的设计有诸多报道,大多数 EEO 采用全球面设计,全视场(FOV)多在 70°左右,如果继续增大视场,则与视场相关的像差校正就会成为设计难点,需要使用数量更多的镜片来校正像差,无法获得轻量化、结构紧凑的系统。相对于球面,非球面能够提供更多的设计自由度,因此在光学系统设计中加入非球面能够显著提升系统的性能,满足系统对大视场、高成像质量及轻量化的设计要求。随着超精密加工与检测技术的快速发展,各种类型非球面的高精度加工与检测成为可能,使得不同数学描述的非球面,如幂级数(PS)^[6]、X-Y 多项式^[7]、Zernike 多项式^[8-10]、径向基函数^[10-11]以及近年提出的 Q-type 非球面^[12-13]等,在光学系统设计中得到了广泛的应用。相比于其他类型的非球面,Q-type 非球面在光学系统优化设计、加工、检测和装配等方面具有一定优势,一经提出就迅速受到业界重视,近年来已经成功应用于手机镜头^[12]和全景环带光学系统^[13]等设计中,获得了良好的设计效果,有效提高了产品的性能。

本文采用 Q-type 非球面设计了一款全新的 EEO 光学系统,该系统全视场达到 110°,超过大多数常见 EEO 光学系统。系统由 6 片透镜组成,总长为 7.89 mm,结构紧凑,透镜最大通光孔径仅为 3 mm,满足小口径要求,在奈奎斯特空间频率 143 lp/mm 处调制传递函数(MTF)高于 0.4,成像质量接近衍射极限,具有较高的成像清晰度和分辨率。

2 Q-type 非球面

2.1 Q-type 非球面描述

1902 年 Abbe^[14]在专利中提出用幂级数附加多项式表示偏离最接近球面后,由于这种非球面表达形式简单、使用方便,幂级数非球面在光学设计领域得到广泛使用。传统幂级数非球面数学表达式由基准二次曲面方程和高次幂级数非球面项构成,可表示为

$$Z = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1 + K)c^2r^2}} + \sum_{m=0}^M a_m r^{2m+2}, \quad (1)$$

式中 c 为非球面顶点处曲率, r 为镜面的孔径半径, K 为二次圆锥系数, a_m 为非球面各高阶项系数。可以看出,当 M 值足够大时,这种表达式可以有足够的自由度以任意精度去近似任意对称面型。但这种表达方法也存在固有的缺陷^[15],对于一个确定形状的曲面 $Z=f(r)$,当利用 10 项以上多项式进行高精度拟合时,即使采用归一化变量 $u=r/r_{\max}$ 和双精度运算,与之相关的 Gram 矩阵也容易呈现病态,导致面型表征失败。而且这种幂级数非球面各项高次系数之间相互关联,在优化设计光学系统时各项系数值之间互相干扰,影响软件优化寻找最佳解的效率。1986 年,Kross 等^[16]引入特殊 Jacobi 多项式^[17]形式的 Zernike 多项式,在对称面上解决数值问题,加强优化,但这种表征形式不能在优化时有效控制系数,无法实时评估设计曲面的可加工性。

为解决上述非球面存在的问题,2007 年,美国 QED 公司 Forbes 博士^[15]提出了一种新的非球面数学描述方式,其中包含两种不同的形式:Q_{con} 非球面和 Q_{bfs} 非球面,业界将其统称为 Q-type 非球面。Q-type 非球面偏离其最接近基准曲面部分的描述也是基于特殊形式的 Jacobi 多项式,不仅可以避免数值问题,而且可在优化过程中有效控制系数,提高优化设计效率,同时对设计非球面的加工、检测及系统装配产生影响。

Q_{con} 多项式定义了一个偏离最接近二次曲面的非球面,其矢高表达式为

$$Z = \frac{c_{\text{con}}r^2}{1 + \sqrt{1 - (1 + K)c_{\text{con}}^2r^2}} + u^4 \sum_{m=0}^M Q_m^{\text{con}}(u^2). \quad (2)$$

Q_{bfs} 多项式定义了一个偏离最接近球面的非球面,其矢高表达式为

$$Z = \frac{c_{\text{bfs}} r^2}{1 + \sqrt{1 - c_{\text{bfs}}^2 r^2}} + \frac{1}{\sqrt{1 - c_{\text{bfs}}^2 r^2}} \left[u^2 (1 - u^2) \sum_{m=0}^M a_m Q_m^{\text{bfs}}(u^2) \right], \quad (3)$$

(2)式和(3)式中 c_{con} 和 c_{bfs} 分别为所表示非球面的最接近二次曲面和球面(即同时通过该非球面顶点和最大通光口径边缘的曲面)的曲率半径; r 为表面的通光半口径,且 $u = r/r_{\text{max}}$; $Q_m(u^2)$ 是一组以 a_m 为系数的 m 阶正交化 Jacobi 多项式,两种形式非球面的 $Q_m(u^2)$ 具体表达形式不同, a_m 为表征偏离基准曲面的系数^[18-19]。本文所使用的非球面面型为 Q_{bfs} 非球面。

所使用的 Q-type 非球面可在 Zemax 等常用光学设计软件中建立模型,进而实现调用。光学设计软件提供了一个动态链接库(DLL)接口,用户可根据软件的编程规则,将 Q-type 非球面的矢高表达式及其光线追迹算法写入一个 C/C++ 文件,再编译为动态链接库文件,插入到软件中的 DLL 文件夹中,即可在软件操作界面像选择其他曲面面型一样调用 Q-type 非球面面型。

2.2 Q-type 非球面特性及优点

与其他传统多项式曲面描述不同的是, Q_{bfs} 非球面偏离其最接近球面的附加项由一个表示沿面法线方向偏离程度的转换因子 $1/\sqrt{1 - c_{\text{bfs}}^2 r^2}$ 和一组特殊 Jacobi 多项式构成的新正交基底组成。由(3)式可得到非球面对其最接近球面在面法向偏离的均方根斜率为

$$K_{\text{RMS}} = \left\langle \left\{ \frac{1}{r_{\text{max}}} \frac{d}{du} \left[u^2 (1 - u^2) \sum_{m=0}^M a_m Q_m^{\text{bfs}}(u^2) \right] \right\}^2 \right\rangle \left[\frac{1}{r_{\text{max}}} \sum_{m=0}^M a_m S_m(u) \right]^2 = \frac{1}{r_{\text{max}}^2} \sum_{m=0}^M a_m^2. \quad (4)$$

K_{RMS} 值是曲面检测时的一个重要参数,与用干涉仪检测非球面时干涉条纹的疏密程度相对应, K_{RMS} 值越大,相应的条纹越密。可以直接检测一个曲面的条件是曲面的干涉条纹密度小于传感器的奈奎斯特最高相应频率^[20]。由(4)式可知,在设计过程中可设置相应的操作数,有效控制多项式参数 r_{max} 和 a_m 的值,使 K_{RMS} 尽量小,从而降低非球面光学零件的检测难度。由于 Q-type 非球面采用正交基底构造附加多项式,避免了各项系数互相干扰和精度丢失,项数的增减不会改变低阶项系数的值。设计人员可根据各系数项对设计非球面贡献量的大小进行取舍,从而有效提高光学系统优化设计效率。

此外,通过有效控制多项式参数,减小 K_{RMS} 值,可使设计的非球面与其最接近球面的偏离程度更小,有利于提高非球面光学零件的加工精度和效率,同时还可以降低透镜的装配敏感性,提高系统的装配效率。

3 光学系统设计

3.1 光学系统设计参数

为在医疗中进行腔体诊断或手术时能够观察到更大范围的信息,同时能够看清更多的细节,电子内窥镜需要具有大视场和高分辨率。同时为避免患者承受更大的痛苦,电子内窥镜的镜头需要具有较小的横向尺寸。综合考虑电子内窥镜对大视场和小型化的使用需求,将物镜光学系统全视场设置为 110° ,采用 1/6 in (1 in = 2.54 cm) 传感器接收像面,传感器有效像面尺寸为 $2.4 \text{ mm} \times 1.8 \text{ mm}$,像元尺寸为 $3.5 \mu\text{m} \times 3.5 \mu\text{m}$,由此可得到光学系统的分辨率为 $N = 1000 / (2 \times 3.5) = 143 \text{ lp/mm}$ 。采用相似成像映射关系,根据目标视场和传感器的尺寸大小,得到系统焦距为 1 mm。工作波段设置为可见光波段,依据《医用内窥镜及附件通用要求》国家标准,工作距离取 20 mm。

对于焦距固定的 EEO 光学系统,为减少探头的移动,缩短对焦时间,系统需要具有较大的清晰成像空间深度,即景深较长。光学系统的景深可表示为

$$\Delta = \Delta_1 + \Delta_2 = \frac{2Df'p^2Z'}{D^2f'^2 - p^2Z'^2}, \quad (5)$$

式中 Δ_1 、 Δ_2 分别为能够在光学系统像平面上成清晰像的远景深度和近景深度, D 为系统的入瞳直径, p 为对准平面与入瞳之间的距离, Z' 为像平面上的弥散斑直径, f' 为系统焦距。由(5)式可知,系统的相对孔径越小(即 F 数越大),景深越大。同时光学系统的像面照度与相对孔径的平方成正比,相对孔径越大(即 F 数越小),像面光照度越高。综合考虑上述两方面因素,将系统 F 数设置为 3.3。具体设计参数如表 1 所示。

表 1 EEO 光学系统的主要参数
Table 1 Main specifications of the EEO optical system

Parameter	Wavelength / nm	F #	FOV / (°)	Working distance / mm	Effective focal length / mm	Overall length / mm	Nominal MTF	Maximal clear aperture size / mm	Number of lens elements	Sensor
Specification	656, 588, 486	3.3	110	20	1	<8	≥40% at 143 lp/mm (Tan/Sag at all fields)	≤3	≤6	CCD 1/6", 3.5 μm pixel size

3.2 初始结构的选取

设计的光学系统具有较大的视场,会使镜头的横向尺寸增大,重量也随之增加,并且由此带来的高级像差校正也更为困难。为此,设计采用具有“负-正”形式的反远距结构^[21],其前组的光焦度为负,可满足系统对大视场和透镜小孔径的需求,后组的光焦度为正,可用于校正系统剩余像差。该结构可得到较大的后工作距,有利于后续传感器安装和机械结构设计。

系统的第一片透镜选用折射率较大的凹透镜,偏折来自物方的大角度光线。第二组和第三组透镜均采用双胶合透镜,由冕牌和火石玻璃构成,用于校正系统的球差和轴向色差。光阑设置在两组双胶合透镜中间。最后一组透镜为正透镜,与前两组双胶合透镜共同校正系统剩余的轴外像差,即彗差、畸变和垂轴色差。根据设计要求,将初始结构的全视场设置为 70°,焦距为 1 mm,设计的 EEO 系统初始结构由全球面透镜组成,如图 1(a)所示,系统总长达到 8.6 mm。初始 MTF 曲线如图 1(b)所示。初始结构的视场、系统总长和成像质量远未达到设计参数的要求,需通过设置适当的操作数调整结构参数(如曲率半径、玻璃与空气厚度、玻璃材料等)进行优化。在优化过程中控制系统焦距不变,逐步增大视场接近目标值,设置操作数限制像差,在适当的位置加入 Q-type 非球面,逐步增加优化系数项,最终达到设计要求。由于设计系统视场较大,轴外像差校正变得困难,因此,非球面位置选在远离光阑处。将最后一组透镜两表面均设置为 Q-type 非球面进行优化,考虑成本因素,将透镜材料设置为有机玻璃(PMMA)。

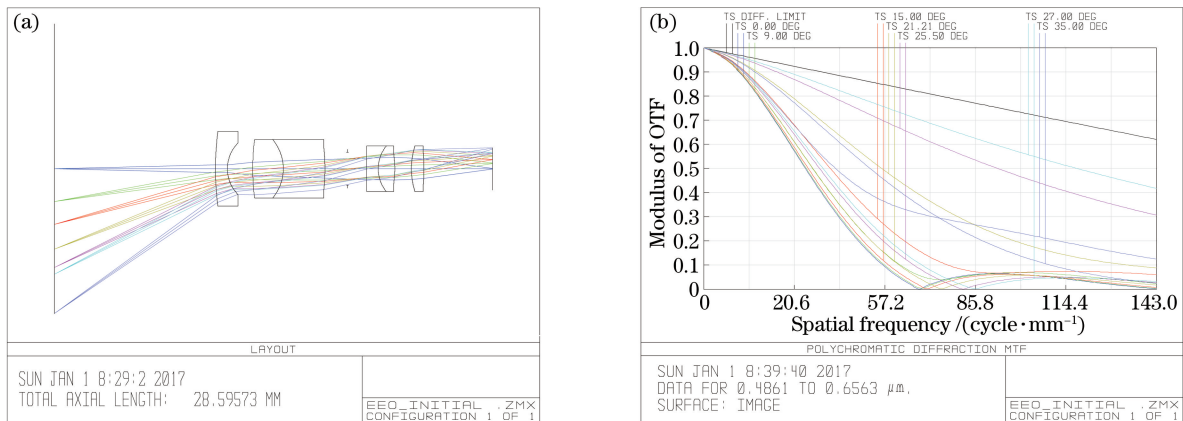


图 1 EEO 初始系统。(a)初始结构; (b)初始 MTF 曲线

Fig. 1 Initial system of EEO. (a) Initial layout; (b) initial MTF curves

3.3 设计结果与像质评价

通过修改结构参数以及设置适当的操作数进行系统优化设计,最终得到光学系统结构如图 2 所示。该 EEO 系统由 6 片透镜组成,包括两组双胶合透镜和两片单透镜,其中最后一组透镜两表面均为 Q-type 非球面,其余表面为球面。系统全视场为 110°,焦距为 1 mm, F 数为 3.3,透镜最大通光孔径为 3 mm,系统总长为 7.89 mm,后工作距为 2.24 mm。各项参数均满足表 1 的设计指标要求,整个系统结构十分紧凑且具有较大后工作距。

图 3 所示为利用 Q-type 非球面设计 EEO 光学系统的成像性能,其中图 3(a)为设计结果的 MTF 曲线。

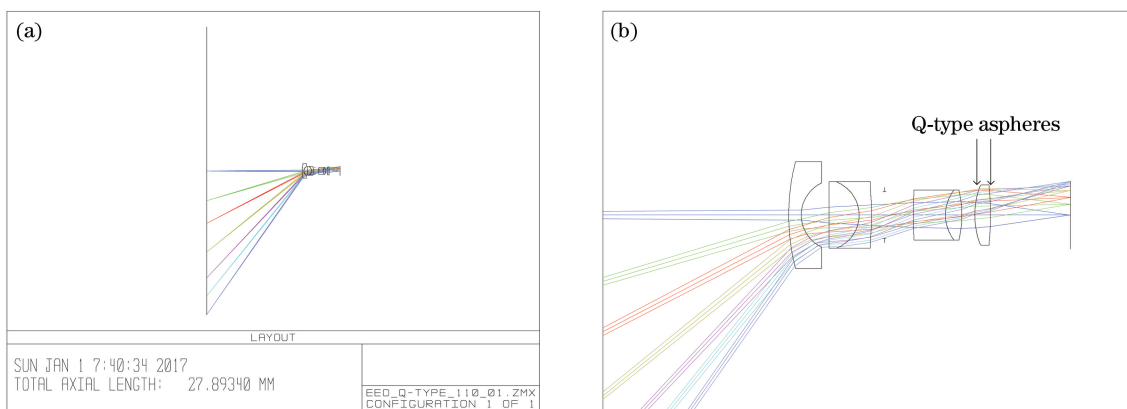


图 2 EEO 光学系统结构。(a)整体结构;(b)局部放大结构

Fig. 2 Structure of EEO optical system. (a) Overall structure; (b) partially enlarged structure

一般情况下,在奈奎斯特空间截止频率处 MTF 值大于 0.3 则满足清晰成像要求。在设计系统全视场内,奈奎斯特空间频率 143 lp/mm 处的 MTF 值均大于 0.4,成像效果接近衍射极限。图 3(b)为设计结果的点列图,在边缘视场处最大均方根弥散斑半径为 2.351 μm ,均小于艾里斑半径 2.507 μm 。图 3(c)为设计结果的光线扇形图,图中坐标轴最大标度为 20 μm ,子午弧矢面像差校正良好。系统具体残余像差值如表 2 所示,参考波长为 0.588 μm 。

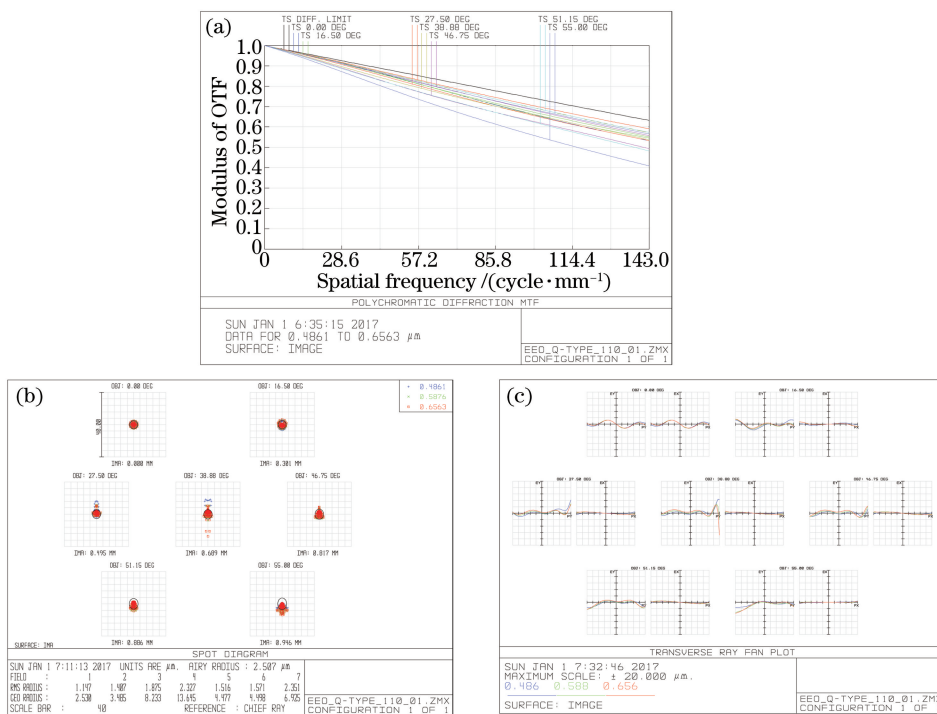


图 3 EEO 光学系统成像性能。(a) MTF;(b)点列图;(c)光线扇形图

Fig. 3 Imaging performances of EEO optical system. (a) MTF; (b) spot diagram; (c) ray fan diagram

表 2 EEO 光学系统残余像差

Table 2 Residual aberrations of EEO optical system

Aberration	Spherical aberration	Coma	Astigmatism	Field curvature	Axial chromatic aberration	Lateral chromatic aberration
Value /mm	8.8×10^{-4}	2×10^{-3}	7.1×10^{-3}	2.2×10^{-3}	1.3×10^{-5}	-6.7×10^{-4}

此外,设计的 EEO 光学系统在边缘处有最大的桶形畸变,为 -33.6%,这是大视场的必然后果。但畸变并不影响成像清晰度,可通过后续图像处理方法进行校正^[22],且电子内窥镜为观察系统,并不影响其使用效果,故允许存在一定的畸变。

4 系统性能分析

4.1 Q-type 非球面设计 EEO 系统与 PS 非球面设计结果比较

为进一步说明基于 Q-type 非球面设计的 EEO 光学系统的性能,在相同的初始结构和参数下,用 PS 非球面设计了一款 EEO 光学系统作为对比。所使用的 PS 非球面为设计中常用的偶次幂级数非球面。

设计中 PS 非球面在结构中的位置与 Q-type 非球面位置相同,所使用的系数自由度也相同。表 3 为最后一块透镜的两个表面 S_{10} 和 S_{11} 上设计的 Q-type 非球面与偶次幂级数非球面的附加多项式参数,PS 非球面最终设计结果如图 4 所示。应用 PS 非球面设计的 EEO 光学系统基本满足表 1 的设计参数要求,但畸变比使用 Q-type 非球面时大约 5%,而且若在设计时继续限制畸变则各项指标会迅速下降,无法达到设计要求。此外在优化设计时,PS 非球面的系数相互关联且变化没有规律,不能进行有效的限制,影响软件优化寻找最佳解效率。因此,与 PS 非球面相比,采用 Q-type 非球面进行优化设计,可在达到较高设计要求的同时提高光学系统设计效率,得到满意的设计结果。

表 3 设计的 Q-type 非球面参数与偶次幂级数非球面参数

Table 3 Parameters of the designed Q-type aspheres and even PS aspheres

Parameter	Q-type asphere		Parameter	Even PS asphere	
	S_{10}	S_{11}		S_{10}	S_{11}
c_{bfs}/mm	0.417848	-0.122563	c/mm	0.627799	-0.295587
r_{\max}/mm	0.738437	0.745478	K/mm	-0.825965	-4.576554
a_0/mm	1.992×10^{-3}	-5.876×10^{-5}	a_4/mm	-1.169×10^{-2}	2.583×10^{-2}
a_1/mm	4.459×10^{-3}	1.152×10^{-4}	a_6/mm	5.670×10^{-2}	-1.766×10^{-2}
a_2/mm	-7.640×10^{-5}	2.189×10^{-5}	a_8/mm	5.245×10^{-2}	1.423×10^{-1}
a_3/mm	7.097×10^{-4}	-4.372×10^{-5}	a_{10}/mm	2.199×10^{-2}	9.180×10^{-3}
a_4/mm	-3.330×10^{-4}	1.697×10^{-4}	a_{12}/mm	2.591×10^{-2}	3.061×10^{-2}
a_5/mm	5.790×10^{-4}	-2.940×10^{-4}	a_{14}/mm	7.457×10^{-2}	1.788×10^{-1}

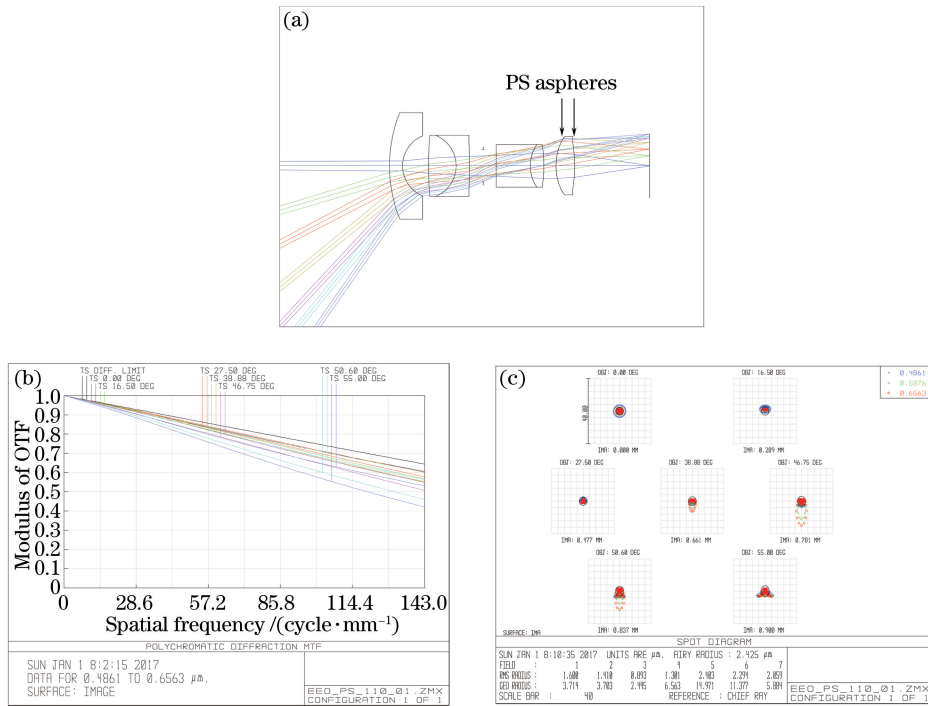


图 4 偶次幂级数非球面设计 EEO 光学系统及其成像性能。(a)系统结构;(b)MTF;(c)点列图

Fig. 4 Layout and its imaging performances of the designed EEO optical system with even PS aspheres.

(a) System layout; (b) MTF; (c) spot diagram

4.2 Q-type 非球面与 PS 非球面的加工分析

在分别应用 Q-type 非球面与 PS 非球面设计 EEO 光学系统之后,得到了相应的相关系数,如表 3 所示。图 5 分别为面 S_{10} 和 S_{11} 上设计的两种非球面的表面面型与非球面对其最接近曲面的矢高偏离量。从图中可以看出对应的两种非球面的通光孔径基本相同,两个 PS 非球面的矢高均大于相应位置的 Q-type 矢高。图中,PS 非球面矢高偏离量的纵坐标数量级为 Q-type 非球面的 35 倍,面 S_{10} 和 S_{11} 上的两个 PS 非球面从孔径中间至边缘矢高偏离量逐渐增大,在边缘处达到最大,为 $22.3 \mu\text{m}$ 和 $31.2 \mu\text{m}$,而 Q-type 非球面的最大矢高偏离量仅为 $0.6697 \mu\text{m}$ 和 $0.0447 \mu\text{m}$,约为对应 PS 非球面矢高偏离量的 $1/33$ 和 $1/700$,与其最接近球面的偏离非常小。尽管 PS 非球面的矢高偏离量为微米量级,但对于直径仅为几毫米的透镜的加工具有较大影响,而 Q-type 非球面与其最接近球面的偏离量很小,且在单位弧长内其矢高的变化量也非常小,使得 Q-type 非球面更易于加工与检测,能够有效提高光学元件的生产效率与成品率,实现低成本大量生产。

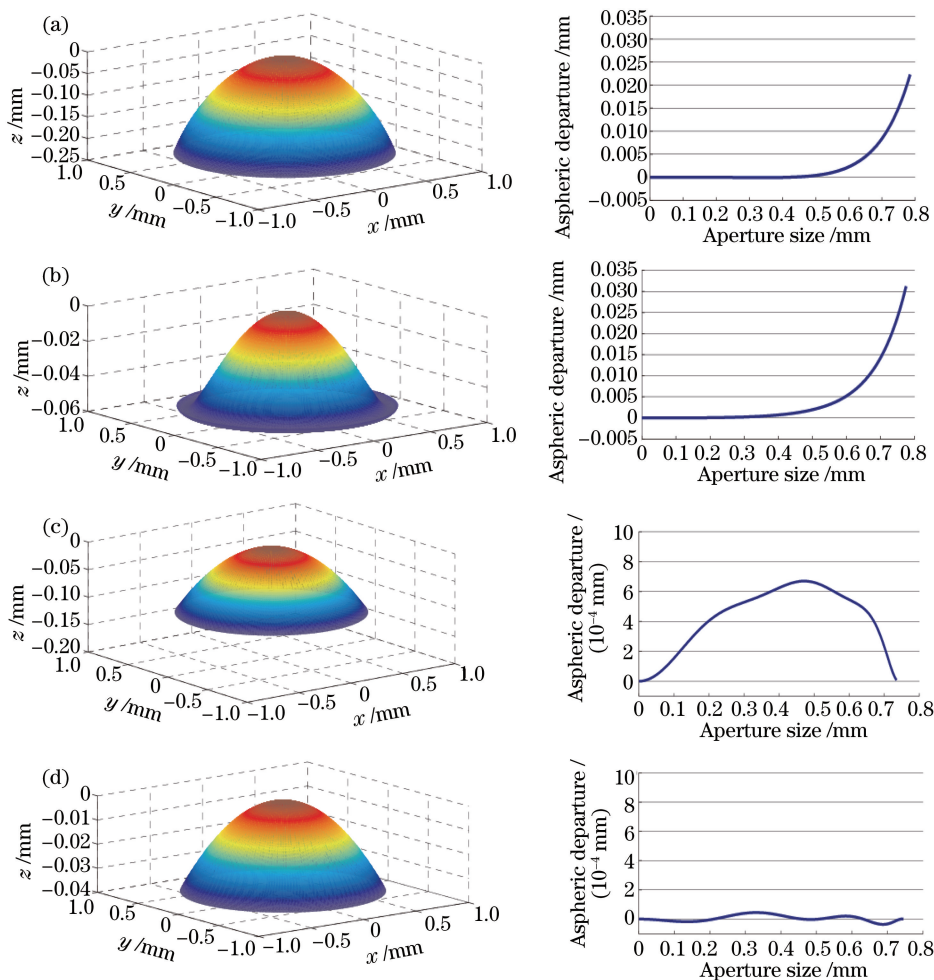


图 5 非球面表面面型与非球面矢高偏离量。(a) PS 非球面 S_{10} ; (b) PS 非球面 S_{11} ; (c) Q-type 非球面 S_{10} ; (d) Q-type 非球面 S_{11}

Fig. 5 Contours and aspheric sag departures of the aspheres. (a) S_{10} of PS asphere; (b) S_{11} of PS asphere; (c) S_{10} of Q-type asphere; (d) S_{11} of Q-type asphere

4.3 系统装配敏感性分析

为进一步分析系统的装配敏感性,分别将 Q-type 非球面和 PS 非球面设计系统中的每个透镜在 y 方向上强制偏心 $20 \mu\text{m}$,以全视场内奈奎斯特空间频率 143 lp/mm 处 MTF 值的变化作为评价标准,得到全视场内最大 MTF 减少量,如图 6 所示。从图中可以看出,第一片透镜 MTF 值减少量较大,这是因为第一片透镜需要偏折来自物方的大角度光线,对成像效果影响较大。Q-type 非球面系统 MTF 的最大减少量均小于 PS 非球面系统,且在具有非球面的最后一块透镜中,Q-type 非球面系统的最大 MTF 减少量约为 PS 非球面系

统的 1/6。与 PS 非球面系统相比,应用 Q-type 非球面设计的 EEO 光学系统在装配时透镜位置偏移敏感性更低,可避免更大 MTF 值的减少。

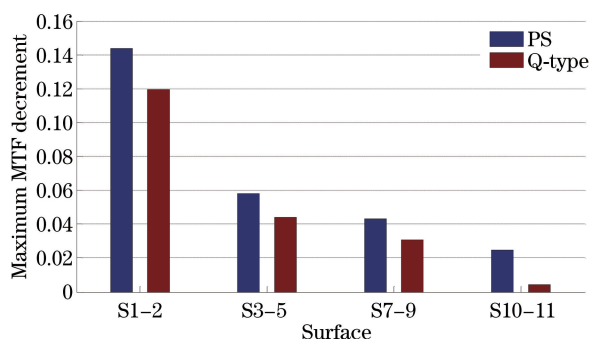


图 6 各元件在 y 方向偏心 $20\ \mu\text{m}$ 后的最大 MTF 减少量

Fig. 6 Maximum MTF decrement of the elements decentered in y direction for $20\ \mu\text{m}$

对两种非球面系统的厚度敏感性也进行了比较分析。分别对两个系统中的每个厚度(包括元件和空气厚度)强制改变 $20\ \mu\text{m}$,将系统均方根波前误差值(RMS-WFE)的改变量作为评价标准,得到 Q-type 非球面和 PS 非球面设计系统的均方根波前误差改变量,如图 7 所示。从图中可看出 Q-type 非球面系统的厚度敏感性整体相对较小,要达到相同的成像质量,在 Q-type 非球面系统中元件厚度的公差范围较大,在系统装配时各元件之间的间隔距离公差范围也相对较大,使得系统装配能够快速完成。

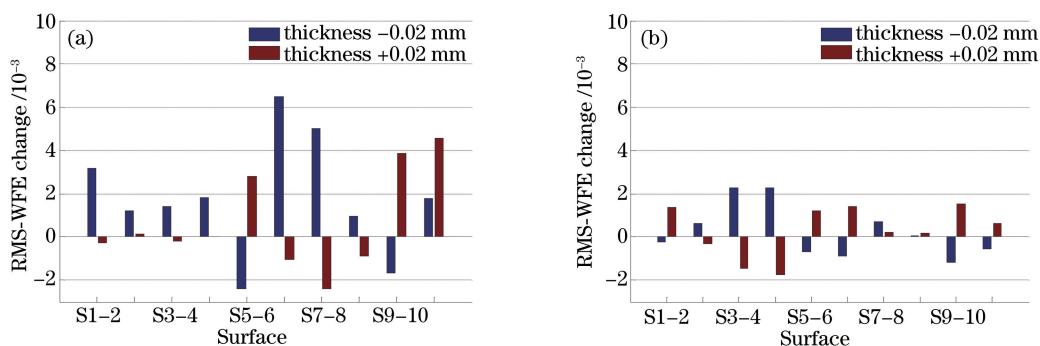


图 7 系统中每个厚度变化 $\pm 20\ \mu\text{m}$ 时 RMS-WFE 的变化。(a) PS 非球面系统;(b) Q-type 非球面系统

Fig. 7 RMS-WFE change versus each thickness change of $\pm 20\ \mu\text{m}$ in the system.

(a) System with PS aspheres; (b) system with Q-type aspheres

5 结 论

采用 Q-type 非球面设计了一款大视场、高性能的 EEO 光学系统,该系统焦距为 $1\ \text{mm}$,全视场为 110° , F 数为 3.3,最大通光孔径为 $3\ \text{mm}$,系统总长为 $7.89\ \text{mm}$,结构紧凑,且横向尺寸较小,成像质量接近衍射极限。设计结果表明利用 Q-type 非球面设计 EEO 光学系统具有一定优越性,有利于得到大视场、高成像质量且结构紧凑的光学系统。在相同的结构和参数下,利用偶次幂级数非球面设计了一款 EEO 光学系统,并分析比较了两个光学系统的性能。结果表明,Q-type 非球面系统具有更强的系统像差校正能力,且有利于提高光学系统优化设计效率;设计得到的 Q-type 非球面与其最接近球面的矢高偏离量非常小,有利于提高非球面光学元件的加工效率与检测精度,降低成本;同时 Q-type 非球面设计 EEO 系统的装配敏感性比 PS 非球面设计系统更低,有利于提高系统的装配效率。

参 考 文 献

- [1] Yu Lu, Cheng Dewen, Zhou Wei, *et al.* Optimization design of rigid endoscope with high definition and large depth of field[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(11): 1122003.

禹 璐,程德文,周 伟,等. 大景深高清硬性内窥镜光学系统的优化设计[J]. 光学学报, 2013, 33(11): 1122003.

- [2] Saar B G, Johnston R S, Freudiger C W, *et al.* Coherent Raman scanning fiber endoscopy[J]. *Opt Lett*, 2011, 36(13): 2396-2398.
- [3] Zou Y C, Zhang W, Chau F S, *et al.* Miniature adjustable-focus endoscope with a solid electrically tunable lens[J]. *Opt Express*, 2015, 23(16): 20582-20592.
- [4] Wang J P, Xie S X, Li W, *et al.* New approach for enlargement of medical electronic endoscopic images[J]. *Appl Opt*, 2002, 41(11): 2158-2163.
- [5] Kemper B, Dirksen D, Avenhaus W, *et al.* Endoscopic double-pulse electronic-speckle-pattern interferometer for technical and medical intracavity inspection[J]. *Appl Opt*, 2000, 39(22): 3899-3905.
- [6] Xiong Shengjun, Zhang Ying, Zhao Huijie, *et al.* Aspheric optical design of an imaging spectrometer based on acousto-optic tunable filter[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(6): 0622002.
熊胜军, 张颖, 赵慧洁, 等. 声光可调谐滤波器成像光谱仪非球面光学系统设计[J]. *光学学报*, 2012, 32(6): 0622002.
- [7] Wang Qingfeng, Cheng Dewen, Wang Yongtian. Description of free-form optical curved surface using two-variable orthogonal polynomials[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 33(9): 0922002.
王庆丰, 程德文, 王涌天. 双变量正交多项式描述光学自由曲面[J]. *光学学报*, 2012, 33(9): 0922002.
- [8] Hu Xiaochuan, Wang Du, Chen Lixia, *et al.* Effect analysis of self-correction method based on the prediction model of deformable mirror with thermal deformation[J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(12): 1202001.
胡小川, 王 度, 陈丽霞, 等. 基于变形镜热形变预估模型的自校正效果分析[J]. *中国激光*, 2015, 42(12): 1202001.
- [9] Shi Haodong, Zhang Xin, Wang Lingjie, *et al.* Aberration properties of off-axis freeform surface optical system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(7): 0708001.
史浩东, 张 新, 王灵杰, 等. 偏轴自由曲面光学系统像差特性研究[J]. *光学学报*, 2016, 36(7): 0708001.
- [10] Ye Jingfei, Gao Zhishan, Liu Xiaoli, *et al.* Freeform surface reconstruction based on Zernike polynomials and radial basis function[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(8): 0822003.
叶井飞, 高志山, 刘晓莉, 等. 基于 Zernike 多项式和径向基函数的自由曲面重构方法[J]. *光学学报*, 2014, 34(8): 0822003.
- [11] Li Hua, Zhang Xin, Wang Chao, *et al.* Optical design of an avionic helmet-mounted displays using freeform surface[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(3): 0322001.
李 华, 张 新, 王 超, 等. 自由曲面机载头盔显示器光学系统设计[J]. *光学学报*, 2014, 34(3): 0322001.
- [12] Ma B, Sharma K, Thompson K P, *et al.* Mobile device camera design with Q-type polynomials to achieve higher production yield[J]. *Opt Express*, 2013, 21(15): 17454-17463.
- [13] Zhou Xiangdong, Bai Jian. Small distortion panoramic annular lens design with Q-type aspheres[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(7): 0722003.
周向东, 白 剑. Q-type 非球面小畸变全景环带光学系统设计[J]. *光学学报*, 2015, 35(7): 0722003.
- [14] Abbe E. Lens system: US697959[P]. 1902-04-22.
- [15] Forbes G W. Shape specification for axially symmetric optical surfaces[J]. *Opt Express*, 2007, 15(8): 5218-5226.
- [16] Kross J, Oertmann F W, Schuhmann R. On aspherics in optical systems[C]. *SPIE*, 1986, 655: 300-309.
- [17] Bhatia A B, Wolf E, Born M. On the circle polynomials of Zernike and related orthogonal sets[J]. *Proc Cambridge Philos Soc*, 1954, 50(1): 40-48.
- [18] Forbes G W. Robust and fast computation for the polynomials of optics[J]. *Opt Express*, 2010, 18(13): 13851-13862.
- [19] Forbes G W. Robust, efficient computational methods for axially symmetric optical aspheres[J]. *Opt Express*, 2010, 18(19): 19700-19712.
- [20] Forbes G W. Manufacturability estimates for optical aspheres[J]. *Opt Express*, 2011, 19(10): 9923-9941.
- [21] Song Maoxin, Sun Liang, Hong Jin, *et al.* Optical design of wide spectral range aerosol detection lens with wide-angle and uniform image[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(11): 112206.
宋茂新, 孙 亮, 洪 津, 等. 气溶胶探测的宽波段超广角均匀像面镜头设计[J]. *激光与光电子学进展*, 2015, 52(11): 112206.
- [22] Zhang Chunming, Xie Yongchun, Wang Li, *et al.* A method of analyzing image distortion based on conjugate nodal plan[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(11): 1108001.
张春明, 解永春, 王 立, 等. 一种基于共轭节面的图像畸变分析方法[J]. *光学学报*, 2012, 32(11): 1108001.