

一次性硬膜外腔内窥镜光学系统设计

李玉瑶 庞春颖 杨羽 孙晓玲

Design of optical system for disposable epidural endoscope

LI Yuyao, PANG Chunying, YANG Yu, SUN Xiaoling

引用本文:

李玉瑶, 庞春颖, 杨羽, 等. 一次性硬膜外腔内窥镜光学系统设计[J]. 应用光学, 2024, 45(5): 896–902. DOI: 10.5768/JAO202445.0501003

LI Yuyao, PANG Chunying, YANG Yu, et al. Design of optical system for disposable epidural endoscope[J]. Journal of Applied Optics, 2024, 45(5): 896–902. DOI: 10.5768/JAO202445.0501003

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202445.0501003>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

一种2k分辨率内窥镜光学系统设计

Design of endoscopic optical system with 2k resolution

应用光学. 2024, 45(2): 276–281 <https://doi.org/10.5768/JAO202445.0201001>

小口径大视场工业内窥镜光学系统设计

Optical system design of small-caliber and large-field industrial endoscope

应用光学. 2023, 44(1): 17–23 <https://doi.org/10.5768/JAO202344.0101003>

全天候全景监控摄像用光学系统设计

Design of optical system for all-weather and panoramic surveillance camera

应用光学. 2023, 44(3): 484–490 <https://doi.org/10.5768/JAO202344.0301003>

鱼眼镜头光学系统的非球面优化设计

Aspheric optimization design of fisheye lens optical system

应用光学. 2019, 40(5): 863–870 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0505001>

微小球面显微光学系统设计与照明分析

Design and illumination analysis of tiny-spherical microscopic optical system

应用光学. 2023, 44(2): 262–267 <https://doi.org/10.5768/JAO202344.0201004>

低成本小型化遥感光学系统设计

Design of remote sensing optical system with low cost and miniaturization

应用光学. 2024, 45(4): 693–699 <https://doi.org/10.5768/JAO202445.0401004>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2024) 05-0896-07

一次性硬膜外腔内窥镜光学系统设计

李玉瑶^{1,2}, 庞春颖¹, 杨 羽¹, 孙晓玲¹

(1. 长春理工大学生命科学技术学院, 吉林 长春 130022; 2. 长春理工大学中山研究院, 广东 中山 528437)

摘 要: 为了获得硬膜外腔的大视场清晰影像, 利用 Q-type 非球面设计了工作波段为可见光, 视场角为 90° , F 数为 4, 接收器为 0.14 cm ($1/18\text{ inch}$) CMOS 传感器的一次性硬膜外腔内窥镜光学系统。系统由 3 片塑料透镜和 1 片盖玻片组成, 其中第 3 片透镜采用 Q-type 非球面, 结构简单、紧凑、成本低。像质评价结果表明: 在奈奎斯特频率 200 lp/mm 处各视场的调制传递函数均大于 0.27, 接近衍射极限; 各视场均方根半径都小于像元尺寸 $2.5\text{ }\mu\text{m}$, 均在艾里斑范围内; 最大剩余畸变小于 20%, 满足高像质要求。最后, 对系统的鬼像进行了分析与规避, 结果表明, 光瞳鬼像形成的光斑能量弥散, 对像面照度均匀性影响较小; 焦点鬼像形成的光斑尺寸远大于主像点列图, 对成像质量影响较小, 满足成像要求。

关键词: 光学系统设计; 内窥镜; Q-type 非球面; 鬼像

中图分类号: TN202; O439

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202445.0501003

Design of optical system for disposable epidural endoscope

LI Yuyao^{1,2}, PANG Chunying¹, YANG Yu¹, SUN Xiaoling¹

(1. School of Life Science and Technology, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China; 2. Zhongshan Institute of Changchun University of Science and Technology, Zhongshan 528437, China)

Abstract: In order to obtain wide-field and clear image of the epidural space, the disposable epidural space endoscopic optical system was designed using Q-type aspherical surface. The operating band was visible light, the field of view was 90° , the F -number was 4, and the receiver was a $1/18\text{ inch}$ CMOS sensor. The system was composed of three plastic lenses and one cover glass, and the third lens adopted Q-type aspherical surface. Therefore, the structure was simple, compact and low cost. The image quality evaluation results show that the modulation transfer function of each field of view is greater than 0.27 at the Nyquist frequency of 200 lp/mm , which is close to the diffraction limit. The root-mean-square radius of each field is less than the pixel size of $2.5\text{ }\mu\text{m}$, and all are within the Airy spot range. The maximum residual distortion is less than 20%, which meets the requirement of high image quality. Finally, the ghost image of the system was analyzed and evaded. It is shown that the energy of the spot formed by the pupil ghost image is diffused, which has little influence on the uniformity of image illuminance. The spot size of the focal ghost image is much larger than the spot diagram of the main image, which has little impact on the imaging quality and meets the imaging requirements.

Key words: optical system design; endoscope; Q-type aspherical surface; ghost image

收稿日期: 2023-12-21; 修回日期: 2024-01-12

基金项目: 吉林省科技发展规划 (20210401160YY)

作者简介: 李玉瑶 (1983—), 女, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事现代光学系统设计和生物医学光学技术研究。

E-mail: liyuyao1983@163.com

引言

硬膜外腔内窥镜是一种三维、实时、可视的影像系统,可直接、清晰地显示硬膜外腔的解剖结构和病理改变情况,由于其具有创伤小、感染率低、药物可直接注射到病变部位,便于冲洗硬膜外炎性物质和剥离粘连等优点,能够为神经根粘连松解术、激光靶向消融硬膜外腔囊肿等临床治疗提供依据。随着医疗器械领域的革新与发展,硬膜外腔内窥镜朝着更加微创化和精细化的方向发展,因而对内窥镜的结构尺寸和成像质量提出了更高的要求^[1]。为了实现紧凑的横向和纵向尺寸,需要内窥镜结构简单、孔径小,这将导致光学系统成像质量较差,像面照度较低。因此,研究同时满足紧凑结构和高成像质量的内窥镜光学系统具有重要意义。

传统内窥镜价格昂贵,清洗与消毒流程复杂,重复使用易导致细菌和病毒感染,低成本、耗材化的一次性内窥镜成为医用内窥镜行业新一代技术变革^[2]。目前,硬膜外腔内窥镜光学系统多采用球面面型,存在视场不足、像质不佳、结构复杂和纵向尺寸较长等问题。与球面面型相比,非球面可提供更多的优化自由度,Hyeon等采用偶次非球面设计了超小型一次性硬膜外腔内窥镜^[3],但设计效率较低,高阶系数的加工和检测误差较大。Q-type非球面具有斜率约束的特性,相较于其他非球面结构,具有更强的系统像差校正能力,有利于提高光学系统的优化设计效率,提高非球面光学元件的加工和装配效率^[4-6]。将Q-type非球面应用于一次性硬膜外腔内窥镜设计中,可简化系统结构,提升成像质量,提高加工效率与检测精度^[7]。

本文介绍了Q-type非球面在设计、加工和检测等方面的特性,分析了光学设计过程中通过优化函数控制成像质量的方法。采用Q-type非球面设计了一次性硬膜外腔内窥镜光学系统,其工作波段为可见光,视场角为90°,F数为4,接收器为0.14 cm(1/18 inch) CMOS传感器。最后,对设计的系统进行了像质评价和鬼像分析,结果表明,光学系统满足高像质要求,光瞳鬼像和焦点鬼像对像面的照度均匀性和成像质量影响较小。

1 Q-type非球面理论

传统幂级数非球面采用幂级数附加多项式的

形式表示与最接近球面的偏离,其矢高表达式为

$$z = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2r^2}} + \alpha_1 r^2 + \alpha_2 r^4 + \alpha_3 r^6 + \dots \quad (1)$$

式中: c 为顶点处的球面曲率; $r^2 = x^2 + y^2$; k 为圆锥系数; α_1 、 α_2 、 α_3 ...为非球面高阶项系数。实际优化设计时,由于高次非球面项之间是非正交的,高次项系数与面型之间无一一对应关系,导致设计效率较低;10阶以上的高阶系数很小,导致加工和检测误差较大。

为解决上述问题,2007年G.Forbes提出了Q-type非球面,以Q型非标准正交多项式作为附加多项式的非球面,分为以二次曲面为基准的强非球面Q-con(aspheres on a base conic)和以球面为基准的温和非球面Q-bfs(aspheres on a base best-fit sphere)。其矢高可以分别表示为^[8-11]

$$z = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2r^2}} + u^4 \sum_{m=0}^M a_m Q_m^{con}(u^2) \quad (2)$$

$$z = \frac{c_{bfs}r^2}{1 + \sqrt{1 - c_{bfs}^2r^2}} + \frac{u^2(1-u^2)}{\sqrt{1 - c_{bfs}^2r_{max}^2u^2}} \sum_{m=0}^M a_m Q_m^{bfs}(u^2) \quad (3)$$

式中: $u = \frac{r}{r_{max}}$; a_m 为对应多项式系数; M 为附加多项式的项数; $Q_m^{con}(u^2)$ 和 $Q_m^{bfs}(u^2)$ 分别为以 a_m 为系数的 m 阶正交Jacobi多项式; c_{bfs} 为最佳拟合球面的曲率。设计过程中,通过控制各项系数进而对Q-type函数多项式表征的面型偏离量进行控制,实现加工评价,可同时提高光学系统的设计效率和加工效率。

本文采用Q-bfs型非球面,式(3)中Q-bfs型非球面矢高由两项组成,第一项描述了一个球面,第二项描述了非球面对该球面的偏离。系数 $\frac{1}{\sqrt{1 - c_{bfs}^2r_{max}^2u^2}}$ 将光轴方向上非球面与最佳拟合球面的偏离转化为法线方向的偏离,使法线方向偏离的权重均方根斜率值为非球面系数 a_m 的平方和。则法向的偏离斜率为

$$S_m(u) = \frac{d}{du} \{ u^2(1-u^2) Q_m^{bfs}(u^2) \} \quad (4)$$

由于 $S_m(u)$ 正交,则有:

$$\langle S_m(u) S_n(u) \rangle = \delta_{mn} \quad (5)$$

式中 δ_{mn} 为Kronecker符号。若将 $Q_0^{bfs}(u^2)$ 设置为一个标准常数起始量,则高阶项可通过与低阶项正交获得。该系列多项式前6项可表示为^[12]

$$\begin{aligned}
Q_0^{bfs}(u^2) &= 1 \\
Q_1^{bfs}(u^2) &= \frac{1}{\sqrt{19}}(13 - 16u^2) \\
Q_2^{bfs}(u^2) &= \sqrt{\frac{2}{95}}[29 - 4u^2(25 - 19u^2)] \\
Q_3^{bfs}(u^2) &= \sqrt{\frac{2}{2545}}\{207 - 4u^2[315 - u^2(577 - 320u^2)]\} \\
Q_4^{bfs}(u^2) &= \frac{1}{3\sqrt{131831}}\{7737 - 16u^2\{4653 - 2u^2[7381 - 8u^2(1168 - 509u^2)]\}\} \\
Q_5^{bfs}(u^2) &= \frac{1}{3\sqrt{6632213}}\{66657 - 32u^2\{28338 - u^2\{135325 - 8u^2[35884 - u^2(34661 - 12432u^2)]\}\}\}
\end{aligned} \quad (6)$$

由式(3)可得,非球面面型相对于其最接近球面在法线方向偏离的均方根(RMS)斜率可表示为

$$\begin{aligned}
k_{\text{RMS}} &= \left\langle \left\{ \frac{1}{r_{\text{max}}} \frac{d}{du} \left[u^2(1-u^2) \sum_{m=0}^M a_m Q_m^{bfs}(u^2) \right] \right\}^2 \right\rangle = \\
&= \left\langle \left\{ \frac{1}{r_{\text{max}}} \sum_{m=0}^M a_m S_m(u) \right\}^2 \right\rangle = \frac{1}{r_{\text{max}}^2} \sum_{m=0}^M a_m^2 \quad (7)
\end{aligned}$$

优化设计过程中,根据 k_{RMS} 值与 a_m 和 r_{max} 之间的关系,通过优化函数的控制,尽量减小 k_{RMS} 值,以保证其面型易于加工和检测。

2 硬膜外腔内窥镜光学系统设计

2.1 光学系统技术参数

光学系统选用OmniVision公司的OV6922型1/18 inch CMOS图像传感器,由基于光学塑料的球面与非球面透镜组合而成。一次性硬膜外腔内窥镜的超小型结构要求具有长度短、口径小、视场角大等特性,具体技术参数如表1所示。

表1 硬膜外腔内窥镜光学系统设计参数

Table 1 Design parameters of optical system for epidural endoscope

Parameters	Specification
Number of pixel	328×250
Pixel size/ μm	2.5×2.5
Panel size/mm	0.82×0.625
Wavelength/nm	Visible(486.1~656.3)
$F\#$	4.0
Field of view/(°)	90
System length/mm	<1.6
Distortion/%	<20(at 1.0 Field)
Relative illuminance/%	>60(at 1.0 Field)

2.2 结构分析与设计

采用光学设计软件Zemax设计一次性硬膜外

腔内窥镜光学系统,内窥镜结构型式如图1所示。系统由光阑、成像透镜组、盖玻片和CMOS图像传感器组成,成像镜组选用“正-正-负”三片式结构,同时满足大视场和小尺寸的要求。

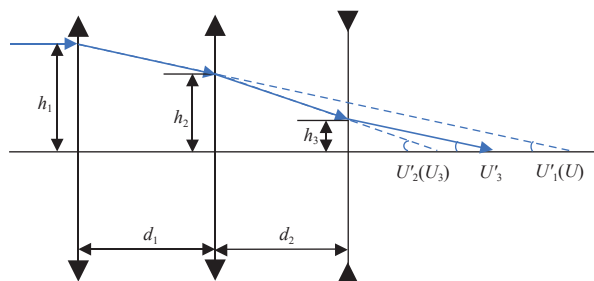


图1 硬膜外腔内窥镜结构型式

Fig. 1 Structural type of epidural endoscope

由图1所示可知,追迹一条平行于光轴的、投射高度为任意值 h_1 的光线,计算出最后出射光线的像方孔径角 U'_3 ,则系统的总焦距 f' 可以表示为

$$f' = \frac{h_1}{\tan U'_3} \quad (8)$$

根据正切计算法可获得成像镜组各片透镜的光焦度分配:

$$\begin{cases} \tan U'_1 = \tan U_2 = \frac{h_1}{f'_1} \\ h_2 = h_1 - d_1 \tan U'_1 \\ \tan U'_2 = \tan U_3 = \tan U_2 + \frac{h_2}{f'_2} \\ h_3 = h_2 - d_2 \tan U'_2 \\ \tan U'_3 = \tan U_3 + \frac{h_3}{f'_3} \end{cases} \quad (9)$$

式中: U_1 、 U_2 和 U_3 分别为第1、第2和第3片透镜的物方孔径角,由于入射光线平行于光轴,故 $\tan U_1 = 0$; U'_1 、 U'_2 和 U'_3 分别为第1、第2和第3片透镜的像方孔径角; h_1 、 h_2 和 h_3 分别为第1、第2和第3片透镜的投射高度; d_1 和 d_2 分别为第1、第

2片透镜和第2、第3片透镜间的空气间隔; f'_1 、 f'_2 和 f'_3 分别为第1、第2和第3片透镜的焦距。

为了有效控制光学系统的彗差、像散、畸变和倍率色差等轴外像差, 将成像透镜组靠近光阑。为了校正大视场所产生的桶形畸变, 将离光阑较远的第3片透镜2个表面 S_6 和 S_7 设置为Q-bfs型非球面, 并对各项系数进行优化设计。为了避免内窥镜复杂的清洗流程和重复使用导致的感染, 设计低成本、耗材化的一次性内窥镜光学系统具有重要意义。本系统材料选用低折射率、低双折射、高透过率的PMMA和日本大阪瓦斯化学高折射率的OKP两种光学塑料, 设计灵活、重量轻、成本低, 容易实现批量生产^[13]。

一次性硬膜外腔内窥镜光学系统如图2所示。系统总长为1.57 mm, 口径小于1 mm, 满足紧凑型结构要求。

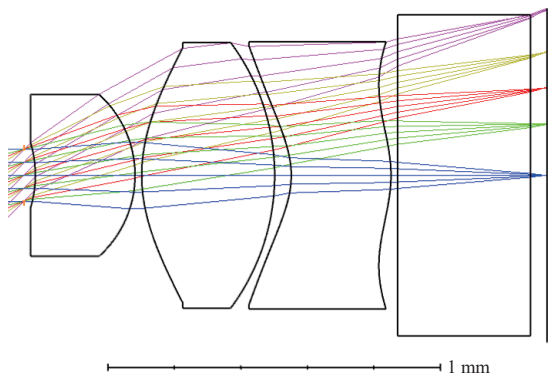


图2 一次性硬膜外腔内窥镜光学系统

Fig. 2 Optical system diagram of disposable epidural endoscope

S_6 和 S_7 这2个表面的非球面系数如表2所示。各项系数在优化过程中彼此相互独立, 可以保留较多的有效数字, 有利于设计优化的效率和元件的加工精度。

表2 非球面系数

Table 2 Aspherical coefficients

Coefficients	S_6	S_7
a_0	0.860 159	0.744 007
a_1	-0.136 558	0.263 194
a_2	0.043 941	-0.074 506
a_3	-0.011 143	0.015 127
a_4	$-2.148\ 213 \times 10^{-3}$	$-8.066\ 591 \times 10^{-4}$
a_5	$-7.474\ 335 \times 10^{-4}$	$-8.922\ 627 \times 10^{-4}$

2.3 像质评价与公差分析

调制传递函数(modulation transfer function,

MTF)是评价光学系统成像质量最客观有效的方法^[14-15], 根据CMOS传感器的像元尺寸 $d=2.5\ \mu\text{m}$, 计算内窥镜系统奈奎斯特频率为

$$\frac{1}{2d} = \frac{1}{2 \times 2.5 \times 10^{-3}} = 200\ \text{lp/mm} \quad (10)$$

内窥镜光学系统的MTF曲线如图3所示。从图3可以看出, 在奈奎斯特频率200 lp/mm处各视场的MTF值均大于0.27, 且接近衍射极限, 满足传感器分辨要求。

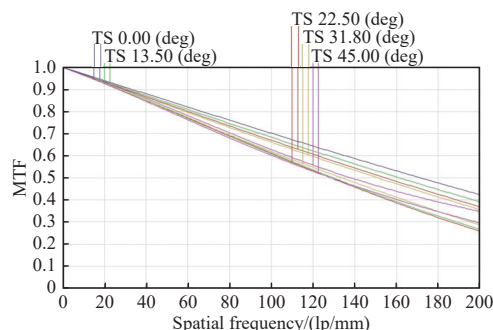


图3 一次性硬膜外腔内窥镜光学系统MTF曲线

Fig. 3 MTF curves of disposable epidural endoscope optical system

图4为内窥镜光学系统的点列图。从图4可以看出, 各视场均方根半径都小于像元尺寸 $2.5\ \mu\text{m}$, 且均在艾里斑范围内, 满足分辨率要求。

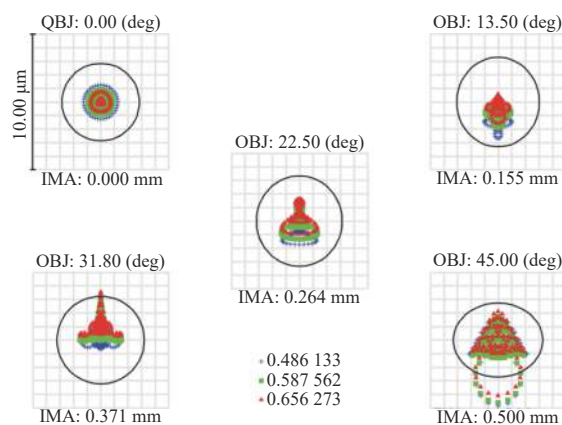


图4 一次性硬膜外腔内窥镜光学系统点列图

Fig. 4 Spot diagram of disposable epidural endoscope optical system

图5为内窥镜光学系统的场曲和畸变曲线。从图5可以看出, 全视场范围内最大场曲和像散分别为 $40\ \mu\text{m}$ 和 $25\ \mu\text{m}$, 满足成像质量要求。对于广角物镜, 边缘视场的畸变导致成像变形严重, 本设计采用Q-bfs非球面控制最大剩余畸变小于20%。倍率色差导致视场边缘呈彩色光斑, 影响成像清

晰度,本设计通过采用两种色散系数不同的光学塑料控制最大倍率色差为 $1.3\ \mu\text{m}$,在艾里斑范围内;相对照度表征轴外视场照度与中心照度的比值,反映了系统的光能损失,本设计全场光照度大于 75%。

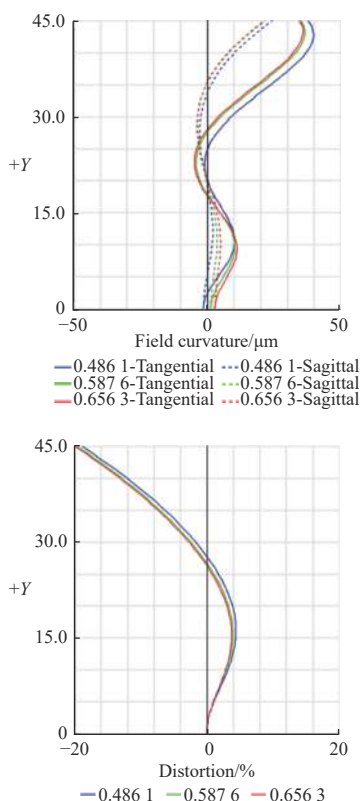


图5 一次性硬膜外腔内窥镜光学系统场曲和畸变曲线

Fig. 5 Field curvature and distortion curves of disposable epidural endoscope optical system

由于一次性硬膜外腔内窥镜光学系统尺寸小、精度高,因此采用 Q1 加工等级对表面公差和元件公差进行分析。灵敏度分析结果如下:

Nominal MTF: 0.363 402 67

Estimated change: -0.048 898 79

Estimated MTF: 0.314 503 88

蒙特卡罗运行 10 000 次,分析结果如下:

MTF(98%) > 0.297 630 15

MTF(90%) > 0.324 453 92

从以上分析结果可知,衍射 MTF 由标称值 0.363 4 下降至 0.314 5,仍然满足成像质量的要求;98% 的衍射 MTF 大于 0.297 6,90% 的衍射 MTF 大于 0.324 5,良品率较高。

将 Q-type 非球面与最接近曲面的面型参数相比,可获得不同口径的矢高偏离量, S_6 和 S_7 表面的最大矢高偏离量分别为 $0.155\ 9\ \mu\text{m}$ 和 $0.271\ 0\ \mu\text{m}$,偏离量较小,易于加工与检测,具有较高的生产效

率,可实现低成本批量生产。

3 光学系统鬼像分析

成像光学系统像面探测器上形成一个或多个与像点相似的像,这种除了主像点以外的其他像统称为鬼像。鬼像是视场内杂散光的另外一种表现形式,是光学系统中任意 2 个表面的残余反射导致部分非成像光线在光学系统焦面附近汇聚形成的附加像。产生鬼像的原因是光学元件和探测器均具有一定的反射率,光线经过二次或多次反射再次成像在探测器表面^[16]。当探测器上形成的鬼像无像差聚焦时,会形成相对背景光较亮的光斑或对比度稍低的其他倍率物体的像,将极大地影响光学系统的成像质量和像面照度均匀性,因此,鬼像分析和规避是成像光学系统必不可少的环节。

鬼像与主像的能量之比可表示为^[17-18]

$$\frac{E_g}{E_i} = \frac{W(t_1 t_2 \dots t_n)^{2m+1} R_d}{W(t_1 t_2 \dots t_n)} = (t_1 t_2 \dots t_n)^{2m} R_d \quad (11)$$

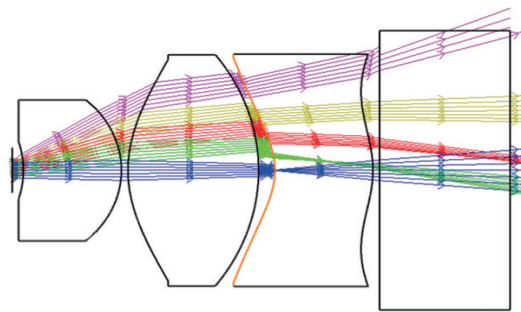
式中: E_g 为鬼像的能量; E_i 为主像的能量; W 为入射光能量; t_n 为第 n 片透镜的透过率; m 为鬼像的级次; R_d 为探测器表面的反射率。

在优化设计过程中,考虑成像质量的同时也要进行鬼像分析,通过对鬼像较大的面间隔和面型进行控制,实现鬼像的规避^[19]。本设计从光阑到像面共 10 个表面,自动过滤光瞳面后要作 $C_9^2 = 36$ 组分析,筛选出离光瞳面和探测器最近的鬼像,分析结果为

Closest ghost pupil: -0.448 8 at 6 then 5

Closest ghost focus: -0.100 0 at 10 then 9

第 6 表面到第 5 表面的反射如图 6 所示。从图 6 可以看出,光瞳鬼像与像面相距较远,像面上的光斑能量弥散。另外,工艺上会对光学元件镀增透膜,以减小反射光能量,因此对光照度均匀性的影响较小。



(a) 光路图

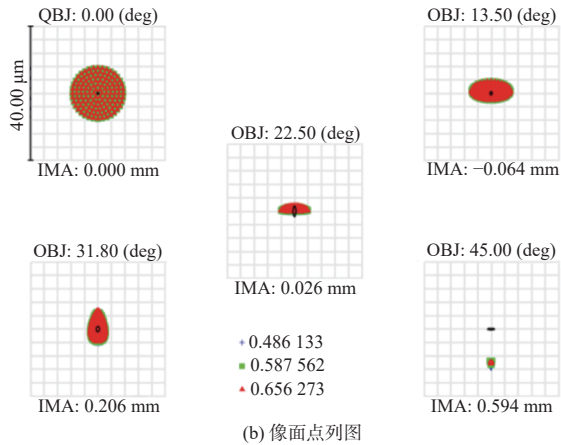


图6 第6表面到第5表面反射形成的光瞳鬼像

Fig. 6 Pupil ghost image formed by reflection from the 6th to 5th surface

第10表面到第9表面的反射如图7所示。由于探测器光敏面具有一定的反射率, 成像光线被反射到盖玻片后表面, 再反射后被探测器接收, 形成焦点鬼像, 但光斑尺寸远大于主像点列图, 因此对成像质量影响可以忽略。

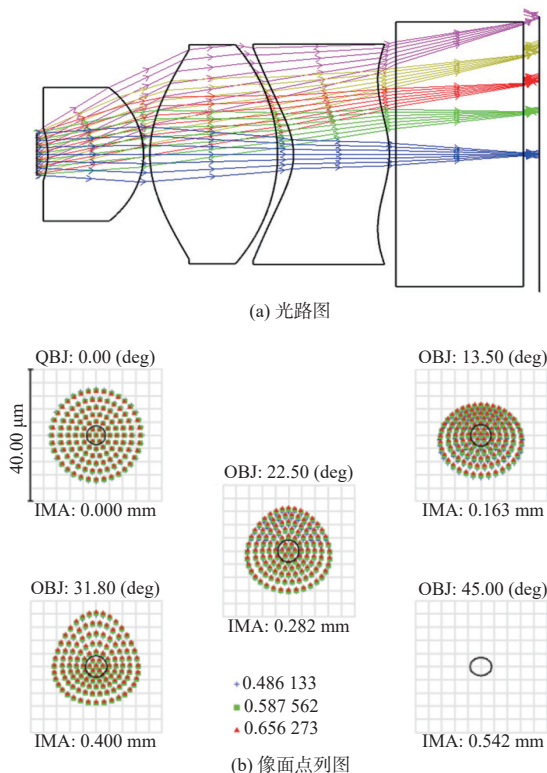


图7 第10表面到第9表面反射形成的焦点鬼像

Fig. 7 Focal ghost image formed by reflection from the 10th to 9th surface

4 结论

本文设计了一款一次性硬膜外腔内窥镜光学

系统, 工作波段为可见光, 视场为 90° , F 数为 4, 接收器为 1/18 inch CMOS 传感器。该系统采用 Q-type 非球面, 成像质量接近衍射极限, 与传统球面和非球面面型相比, 结构简单、畸变小、相对照度较高; 材料选用光学塑料, 便于加工成型, 降低成本, 减小质量; 应用紧凑型结构, 横向尺寸小于 1 mm, 纵向尺寸小于 1.6 mm, 满足硬膜外腔内窥镜微创的使用要求。对设计结果进行了像质评价, 在奈奎斯特频率 200 lp/mm 处各视场的调制传递函数均大于 0.27, 接近衍射极限; 各视场均方根半径都小于像元尺寸 $2.5 \mu\text{m}$, 均在艾里斑范围内; 最大剩余畸变小于 20%。对设计的光学系统进行了鬼像分析, 结果表明: 光瞳鬼像与像面相距较远, 且光斑能量弥散, 对像面照度均匀性影响较小; 焦点鬼像的光斑尺寸远远大于主像点列图, 对成像质量影响可以忽略。

参考文献:

- [1] 朱邨. 多光谱融合内窥镜成像关键技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2022.
ZHU Dan. Research on key technologies of multispectral fusion endoscopic imaging[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2022.
- [2] KOED V D P, BRUNO M J. The potential benefits of an automated flexible endoscope channel brushing system for manual cleaning of endoscopes[J]. *Endoscopy*, 2023, 55(7): 643-644.
- [3] BANG H J, PARK B J, KIM B Y, et al. Design of ultra-compact optical system for disposable epidural spinal endoscope[C]//Optics and biophotonics in low-resource settings III, 2017. Washington: SPIE, 2017: 100550V.
- [4] 李闯, 薛常喜, 杨红芳, 等. 基于 Q-type 非球面的电子内窥镜物镜光学系统设计[J]. *光学学报*, 2017, 37(6): 194-202.
LI Chuang, XUE Changxi, YANG Hongfang, et al. Optical system design of electronic endoscope objective with Q-type aspheres[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(6): 194-202.
- [5] MA B, SHARMA K, THOMPSON K P, et al. Mobile device camera design with Q-type polynomials to achieve higher production yield[J]. *Optics Express*, 2013, 21(15): 17454-17463.
- [6] 史天翼, 杨磊, 刘泽武, 等. 小口径大视场工业内窥镜光学系统设计[J]. *应用光学*, 2023, 44(1): 17-23.

- SHI Tianyi, YANG Lei, LIU Zewu, et al. Optical system design of small-caliber and large-field industrial endoscope[J]. *Journal of Applied Optics*, 2023, 44(1): 17-23.
- [7] 王星琪, 杨波. 胶囊内窥镜系统的像质提升方法[J]. *光学仪器*, 2022, 44(4): 26-31.
- WANG Xingqi, YANG Bo. Image quality enhancement method for capsule endoscope system[J]. *Optical Instruments*, 2022, 44(4): 26-31.
- [8] FORBES G W. Shape specification for axially symmetric optical surfaces[J]. *Optics Express*, 2007, 15(8): 5218-5226.
- [9] FORBES G W. Robust and fast computation for the polynomials of optics[J]. *Optics Express*, 2010, 18(13): 13851-13862.
- [10] FORBES G W. Robust, efficient computational methods for axially symmetric optical aspheres[J]. *Optics Express*, 2010, 18(19): 19700-19712.
- [11] FORBES G W. Manufacturability estimates for optical aspheres[J]. *Optics Express*, 2011, 19(10): 9923-9941.
- [12] 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): 299-305.
- ZHOU Xiangdong, BAI Jian. Small distortion panoramic annular lens design with Q-type aspheres[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(7): 299-305.
- [13] HASEGAWA T, AIZAWA T, INOHARA T, et al. Hot mold stamping of optical plastics and glasses with transcription of super-hydrophobic surfaces[C] // 17th International Conference on Metal Forming, Metal Forming 2018. Toyohashi, Japan: Procedia Manufacturing, 2018: 1437-1444.
- [14] 刘一凡, 胡以华, 张鑫源, 等. 基于调制传递函数的激光反射层析成像质量评价方法[J]. *中国激光*, 2023, 50(6): 0610001.
- LIU Yifan, HU Yihua, ZHANG Xinyuan, et al. Imaging quality evaluation method of laser reflective tomography based on modulation transfer function[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2023, 50(6): 0610001.
- [15] KANG J Q, ZHU R, SUN Y X, et al. Pencil-beam scanning catheter for intracoronary optical coherence tomography[J]. *Opto-Electron Advances*, 2022, 5(3): 69-75.
- [16] 舒政通, 韩赠崇, 吴羽婷, 等. 空间探测相机光学系统的杂散光分析和优化设计[J]. *应用光学*, 2023, 44(5): 982-991.
- SHU Zhengtong, HAN Zengchong, WU Yuting, et al. Stray light analysis and optimization design for optical system of space detection camera[J]. *Journal of Applied Optics*, 2023, 44(5): 982-991.
- [17] 李洋, 鲍书龙, 穆生博, 等. 透射式光学系统焦平面鬼像特性及验证[J]. *光学精密工程*, 2021, 29(11): 2567-2573.
- LI Yang, BAO Shulong, MU Shengbo, et al. Ghost image characteristic and experimental verification of focal plane in refractive optical systems[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2021, 29(11): 2567-2573.
- [18] DIMITRIOS C, HARILAOS G, ALEXANDROS P, et al. Scattering contribution to the double-pass PSF using Monte Carlo simulations. [J]. *Ophthalmic & Physiologic Optics : the Journal of the British College of Ophthalmic Opticians (Optometrists)*, 2017, 37(3): 342-346.
- [19] ZHANG E M, YE W N, XIA Y Z, et al. Identification and analysis of ghost reflection in the interferometers base on ZEMAX by optimization algorithms[J]. *Optical Engineering*, 2023, 62(3): 034103.