文章编号:1001-5078(2019)05-0589-04

·光电技术与系统 ·

基于 Forbes 非球面的胶囊内窥镜光学系统设计

张欣婷1,亢 磊2,吴倩倩1

(1. 长春理工大学光电信息学院,吉林长春130012;2. 中国中车长春轨道客车股份有限公司,吉林长春130062)

摘 要:设计了一套 WCE 光学系统,对可见光波段成像。采用反远距的光学结构形式,共使 用4 片透镜,引入两个 Forbes 非球面来提高系统的整体性能,并做到仪器的小型化。系统视场 角 150°,相对孔径 1/3,入瞳直径 0.35 mm,总长 8.3 mm。各视场的调制传递函数曲线在奈奎 斯特频率 143 lp/mm 时均高于 0.6,分辨率较高;各视场的点列图几乎都在艾里斑之内;彗差、 像散、场曲、畸变、倍率色差等轴外像差也得到了很好的校正,成像质量较好,能够满足 WCE 光学系统的要求。

关键词:胶囊内窥镜;Forbes 非球面;高分辨率;大视场;光学设计 中图分类号:O439 文献标识码:A DOI:10.3969/j.issn.1001-5078.2019.05.013

Capsule endoscope optical system design based on Forbes aspheric surface

ZHANG Xin-ting¹, KANG Lei², WU Qian-qian¹

(1. School of Optical and Electronic Information, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130012, China;
 2. CRRC Changchun Railway Vehicles Co., Ltd., Changchun 130062, China)

Abstract: A set of WCE optical system is designed for visible light imaging, the system adopts the optical structure of reverse distance and uses 4 lenses in total. Two Forbes aspherical surfaces are introduced to improve the overall performance of the system and to achieve miniaturization of the instrument. The field angle of the system is 150°, the relative aperture is 1/3, the diameter of the pupil is 0.35mm, and the total length is 8.3mm. The modulation transfer function curves of each field of view are higher than 0.6 at the Nyquist frequency of 1431p/mm with a higher resolution. The spot diagram of each field of view is almost within the Airy disk. Aberrations such as coma, astigmatism, field curvature, aberration and chromatic aberration have also been well corrected. The imaging quality is better, which can meet the requirements of WCE optical system.

Key words: capsule endoscope; Forbes aspheric surface; high resolution; large field; optical design

1 引 言

无线胶囊内窥镜 WCE(Wireless Capsule Endoscopy,简称胶囊内窥镜)最早出现在以色列,由 GivenImage 公司于 2000 年率先研制出来,并在临床上 实验成功,其成型产品于 2001 年上市,命名为 M2A (Mouth to Anus)^[1-4]。胶囊内窥镜是整体胶囊内窥 系统中的可吞服部分,由于其外形类似一枚胶囊所 得名,其外壳由特殊材料制成,具有防水、抗腐蚀等 特性。胶囊内窥镜的结构组成如图1所示^[5-6],包 括 LED 光源、光学系统、无线传输模块、电源模块以

基金项目:吉林省科技厅重点科技研发项目(No. 20180201044YY)资助。

作者简介:张欣婷(1984 -), 女, 副教授, 博士, 主要研究方向为光学设计与光学仪器及检测。E-mail: luoyiwuhens@ 163. com

收稿日期:2018-08-30;修订日期:2018-09-18

及用于磁定位的磁罩。



Fig. 1 Structure of capsule endoscope

在病人服下胶囊内窥镜之后,它会随着胃肠道 的蠕动进入人体消化系统并缓慢移动,完成拍摄,并 将其图像信号发送给人体体外的接收板接收,储存 在 PC 或相关设备中,经由食道、胃、小肠、大肠等部 位,完成对消化系统的检测,因此又被人称作"行走 在消化道的机器人"^[7]。医生们既可实时观测病人 的病理数据,又可在 WCE 工作完成后进行观察分 析,从而拟定治疗方案。

WCE 光学系统是胶囊内窥镜的重要部分,应 具备高分辨率、大视场、长工作距等特性,且希望 镜头的尺寸小、质量轻、易集成。目前所能查阅到 关于胶囊内窥镜光学系统设计的资料^[8]并不多, 其视场均未超过110°,且透镜片数为6片左右,其 外形尺寸一般控制在 ϕ 12mm × L30 mm 以内。若 要提高系统性能,就需要增加透镜片数来校正像 差,但这又与系统的小型化相矛盾。相对于球面 而言,非球面具备更多的设计自由度来提高系统 成像质量及性能,满足大视场、高分辨率、小型化 的设计要求。

本文采用反远距的结构形式设计了4片式胶囊 内窥镜,并引入Forbes 非球面进行优化设计。系统 视场角150°,相对孔径1/3,入瞳直径0.35 mm,总 长8.3 mm,既实现了高性能,又做到了小型化。

2 Forbes 非球面

众所周知,在光学设计中引入非球面能够使系统获得更多的自由度、提升像差校正能力、简化系统结构。但是在非球面的使用过程中,如何选取合适的非球面系数项是一个关键问题,传统的非球面方程无法给出较好的解决方案。目前可用于表征非球面面型的方程种类较多,如:splines,Zernike polynomials,implicit surface definition, transcendental functions,Chebyshev polynomials,以及通常使用的传统非

球面方程:

$$z(\rho) = \frac{c\rho^2}{1 + \sqrt{1 - (1 + K)c^2\rho^2}} + \rho^4 \sum_{m=0}^M A_{2m+4}\rho^{2m}$$
(1)

式中,K为二次曲面系数;c为曲率半径的倒数; ρ 为垂直光轴方向的径向坐标; A_{2m} 为非球面系数。

从式(1)中可以看出,该方程的表达形式比较 简单,但却存在如下问题:

① 非球面系数无直观物理意义:在该非球面方 程中,半径 ρ 并未归一化;

② 无法判断非球面系数所取的项数:该表达式中的各项相互关联,通常所取的项数有可能多余,也有可能不够;

③ 有效数字易丢失:非球面系数 A_{2m} 数值较小, 为了更精准的表示出非球面面形,需要增加有效数 字位数,当用科学计数方法表达各个非球面系数时, 其有效数字易丢失;

④ 无法对非球面系数进行公差分析:各项非球 面系数之间相互关联,非正交。

考虑到以上这些问题在非球面的设计和加 工方面有所困难,本文使用 Forbes 非球面方程, 来解决传统非球面方程存在的问题。Forbes 非球 面是 2007 年提出的,有两种不同的表示形式,一 种是偏离最接近二次曲面的非球面(Forbes strong aspheric),另一种是偏离最接近球面的非球面 (Forbes mild aspheric),其方程分别如式(2)、式 (3)所示:

$$u = \rho / \rho_{\max}$$

$$z(\rho) = \frac{c\rho^2}{1 + \sqrt{1 - (1 + K)c^2\rho^2}} + u^4 \sum_{m=0}^{M} a_m Q_m(u^2)$$
(2)

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

式中, ρ_{max} 为元件边缘到光轴的距离; a_m 为多项式 系数;Q为方程中的各个多项式;u为孔径角; c_{bfs} 为 最佳拟合球面的曲率; c_{bfs} 的选择原则是使最佳拟合 球面的顶点与非球面顶点重合,两者之间最大偏离 量尽量小。本文选取第一种表示形式,即(2)式所 示的 Forbes 非球面进行设计。

表1所示为同一个非球面分别用普通非球面方 程和 Forbes 非球面方程表述时,各项级数及非球面 系数的对比。 表1 普通非球面方程与 Forbes 非球面方程对比 Tab.1 Comparison between ordinary aspheric

equation and Forbes aspheric equation

立 王	普通非球面	Forbes 非球面		
级数	非球面系数 A_{2m}	级数	非球面系数 a_m /mm	
4	-2.95492×10^{-6}	0	- 199. 992	
6	- 2. 00731 × 10 ⁻⁹	1	-9.087	
8	-3.56923×10^{-13}	2	-0.854	
10	-3.09812×10^{-16}	3	- 0. 089	
12	- 1. 89993 × 10 ⁻¹⁹	4	-0.004	

从表1中可以得出如下结论:

①采用 Forbes 非球面的非球面系数有效数字 较少;

②非球面系数 a_m 的值随级数的增加而减小;

③高次非球面系数值很小,如表1中4级非球 面系数为-0.004 mm,并不会对整体非球面面型造 成太大影响,可忽略不计。

因此,可以通过 Forbes 非球面系数的大小来判断级数的取值,即非球面方程取几项,这对于其他类型的非球面时无法实现的。

3 WCE 光学系统设计

3.1 技术指标

由于胶囊内窥镜是为了减轻病人检查的痛苦, 因此要求其体积小型化,即需要有较小的横向尺寸 和入瞳直径。同时,为了观察到更大范围的信息,需 要具有大视场和高分辨率。综合上述设计要求考 虑,给出具体技术指标,如表2所示。

表 2	技术指标	

']	ľab.	2	Tec	ehnical	ind	licators
----	------	---	-----	---------	-----	----------

焦距/mm	F 数	入瞳直径/mm	视场角/℃
1	2.9	0. 25	150

3.2 WCE 光学系统结构选取

本文设计的 WCE 光学系统焦距很小,仅1 mm, 因此轴上像差的数值不大,这在光学设计中是比较 容易校正的。但项目要求视场角为150°,这属于超 广角镜头,大视场所引入的轴外像差较难校正。为 解决上述问题,需要使用非球面,而对于本系统而 言,传统的圆锥曲面或偶次非球面又无法达到很好 的成像质量,因此引入 Forbes 非球面来解决 WCE 光学系统轴外像差的问题。同时,WCE 光学系统采 用反远距结构^[9-10],孔径光阑位于前组和后组之 间,前组为负光焦度、后组为正光焦度。当前组的光 焦度较小,即焦距较大时,轴外光线通过前表面后的 发散程度越小,有利于后表面的设计。

3.3 光电探测器选取

综合考虑 WCE 光学系统大视场、小型化的使 用需求,选取 1/2 CCD 作为本系统的探测器。探测 器光敏面尺寸 6.4 mm × 4.8 mm,单个像元尺寸 3.5 μm × 3.5 μm,WCE 光学系统的分辨率为:

$$\sigma = \frac{1}{2d} = \frac{1}{3.5 \ \mu \text{m}} = 143 \ \text{lp/mm}$$
 (4)

式中,d表示单个像元尺寸,单位 mm;分辨率单位为 lp · mm⁻¹。

3.4 WCE 光学系统设计结果

本文设计的 WCE 光学系统采用反远距型结构,如图2所示。系统共采用4片透镜,其中第二片透镜的前表面和第三片透镜的前表面采用 Forbes 非球面。



图 2 光学系统结构图 Fig. 2 Configuration diagram optical system

图 3 所示为系统的调制传递函数曲线。根据式 (4)所计算的分辨率,奈奎斯特频率选取 143 lp/mm,此时的调制传递函数曲线均在 0.6 以 上,成像质量较好。



个视场的点列图几乎都在艾里斑之内,并且色差不 大,成像质量较好。

图 5 所示为系统的光线像差曲线。各视场的子 午像差特性曲线和弧矢像差特性曲线均贴近横坐标 轴,说明系统的彗差和场曲较小。



Fig. 5 Ray fan curve

图 6 所示为系统的畸变为曲线。边缘处最大畸 变为 - 16%,为桶形畸变,尽管该畸变值并不小,但 这对于大视场系统而言是必然存在的。且 WCE 系 统属于观察系统,畸变并不影响成像清晰度,其形变 可通过后续图像处理技术校正,因此允许存在一定 的畸变。



Fig. 6 Field curved/distortion

4 结 论

本文在分析了胶囊内窥镜发展现状及原理的基础上,设计了一套WCE光学系统。该系统采用反远距的结构形式,共4片透镜,引入两个Forbes非球面来提高系统的整体性能,并做到仪器的小型化。系统视场角150°,相对孔径1/3,入瞳直径0.35 mm,总长8.3 mm。调制传递函数曲线在奈奎斯特频率143 lp/mm时均高于0.6,彗差、像散、场曲、畸变等轴外像差也得到了很好的校正,能够满足WCE光学系统的要求。

参考文献:

- Gavriel Iddan, Gavriel Meron, Arkady Glukhovsky. Wireless capsule endoscopy [J]. Nature, 2000, 405 (6785):417.
- [2] ZHANG Yanhui, HUANG Zhanhua. The research progress and discussion about wireless capsule endoscope[J]. China Medical Devices, 2011, 26(8):60-62. (in Chinese) 张艳辉,黄战华. 无线胶囊内窥镜的研究进展和讨论 [J]. 中国医疗设备, 2011, 26(8):60-62.
- [3] Gavriel D. Meron. The development of the swallowable video capsule (M2A) [J]. Gastrointestinal Endoscopy, 2000,52(6):817-819.
- [4] Zvi Fireman, Arkady Glukhovsky, Eitan Scapa. Future of capsule endoscopy[J]. Gastrointestinal Endoscopy Clinics of North America, 2004, 14(1):219 – 227.
- [5] Doron Fischer, Reuven Schreiber, Daphna Levi, et al. Capsule endoscopy: the localization system [J]. Gastrointestinal Endoscopy Clinics of North America, 2004, 14 (1):25-31.
- [6] HU Yuxi, ZHOU Shaoxiang, Micro video lens design for hidden color CCD cameras[J]. Optical Technique, 1999, 6(3):22-24. (in Chinese)
 胡玉禧,周绍祥. 隐秘型 CCD 微摄像头光学设计[J]. 光学技术, 1999, 6(3):22-24.
- [7] Mitsujiro Konno, Hino. Capsule endoscope. US: 7319896[P]. 2008.
- [8] Mang Ou-Yang, Shih-Wei Huang, Yung-Lin Chen, et al. Distortion improvement of capsule endoscope image[J]. Proc. of SPIE, 2007, 6430(18):1-9.
- [9] YU Daoyin, TAN Hengying. Engineering optics[M]. Beijing: China Machine Press, 2011. (in Chinese) 郁道银,谈恒英. 工程光学[M]. 北京: 机械工业出版 社,2011.
- [10] W J Smith. Modern lens design[M]. New York: McGraw-Hill Companies, 2005.