

文章编号:1002-2082(2018)03-0418-05

微型光纤传像束内窥镜的物镜设计

朱晓冬¹, 叶兵¹, 李凯², 马伟东¹

(1. 合肥工业大学 智能制造技术研究院, 安徽 合肥 230001;

2. 安徽航天生物科技股份有限公司, 安徽 蚌埠 233000)

摘要:根据微型纤维软镜小尺寸、大视场的要求,分析其设计准则,采用“负-正”型反远距物镜作为初始结构,确定其为像方远心光学系统。通过理论计算和 Zemax 光学仿真软件的不断优化,最终设计出了一个工作波段在 $0.48\ \mu\text{m} \sim 0.65\ \mu\text{m}$, 焦距为 $0.37\ \text{mm}$, 全视场 90° , 相对孔径为 $1:4$ 的微型光纤传像束内窥镜物镜。该物镜由 4 片透镜组成,包括 1 片负透镜、1 片正透镜和 1 片双胶合透镜。设计结果表明:镜头总长 $3.89\ \text{mm}$, 最大横截面直径 $0.95\ \text{mm}$, 满足像方远心光学系统的初始设计要求,在奈奎斯特空间频率 $77\ \text{lp/mm}$ 处的调制传递函数(MTF)近似为 0.7 , 接近衍射极限,并且具有小尺寸、大视场、像质优良、结构合理、像面光照强度均匀等特点,符合微型纤维式内窥镜的使用条件。

关键词:应用光学;像方远心;光纤传像束;物镜;极限分辨率

中图分类号: TN 253

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO201839.0305003

Objective lens design of subminiature endoscope with image fiber bundles

Zhu Xiaodong¹, Ye Bing¹, Li Kai², Ma Weidong¹

(1. Institute of Intelligent Manufacturing Technique, Hefei University of Technology, Hefei 230001, China;

2. Anhui Aerospace Biotechnology Co., Ltd., Bengbu 233000, China)

Abstract: According to the requirements of small size and large field of view(FOV) for subminiature fiber soft endoscope, the fundamental design criteria was analyzed, the retrofocus objective with a “negative-positive” form was utilized as the initial structure, and the telecentric optical system in image space was determined for this design. Through theoretical calculation and continuous optimization with Zemax optical design software, a designed subminiature endoscope objective lens sample was fabricated finally, with operation wavelength, focal length, FOV and relative aperture of $0.48\ \mu\text{m} \sim 0.65\ \mu\text{m}$, $0.37\ \text{mm}$, 90° and $1:4$, respectively. The optical system is composed of 4 pieces of lenses, including two single lenses and one cemented doublet. The result shows that its total length is $3.89\ \text{mm}$ and maximum cross sectional diameter is $0.95\ \text{mm}$, which can satisfy the initial design requirements of image telecentric structure. The modulation transfer function (MTF) value of the lens is approximately 0.7 at Nyquist spatial frequency of $77\ \text{lp/mm}$, near the diffraction limit. Furthermore, the designed lens has the peculiarity of wide FOV, short focal length, fine quality of imaging, reasonable structure and uniform illumination at image plane. It is suitable for the subminiature fiber endoscope demand.

Key words: applied optics; telecentric image space; imaging fiber bundle; objective; limiting resolution

收稿日期:2017-11-17; 修回日期:2017-12-22

基金项目:国家自然科学基金(51375136)

作者简介:朱晓冬(1991—),男,安徽合肥人,硕士研究生,主要从事现代光学技术与工程应用方面的研究工作。

E-mail:13625519203@163.com

引言

内窥镜技术随着科学的进步在不断地提升,在工业制造、机械加工、电力电子、土木建筑等一系列相关领域得到广泛的应用,特别在医疗领域,内窥镜成为日常诊疗和手术中必不可少的设备。自1853年以来,法国外科医生发明了第一个内窥镜设备,内窥镜技术一直在不断发展。近年来,内窥镜发展产生了更多的形式:超细纤维内窥镜、超长视频内窥镜,多弯头管道检测内窥镜、立体声双通道内窥镜等。目前国外关于各类内窥镜的研发和生产技术已经相当成熟,如英国超细技术公司的LD纤维内窥镜,分辨率可达 $30\text{ lp/mm}\sim 50\text{ lp/mm}$,直径仅为 0.34 mm ,日本的奥林巴斯、德国的狼牌都在纤维内窥镜的研发和生产上取得了巨大的成功。我国从20世纪70年代开始就逐渐展开了应用于不同场合的工业类和医疗类内窥镜的研究与开发。其中燕山大学的李东源等人设计的折衍混合型光学系统,通过非球面透镜的引入改善了图像的成像质量,使得系统的总体体积和质量得到控制,从而获得具有大视场、小像差的光纤耦合物镜,但其材料与加工成本随之较高^[1]。长春理工大学根据新型的工业内窥镜的要求,对整体的光学系统进行了设计,但其物镜的视场角仅有 60° ^[2]。随着新型材料的出现和加工工艺的不断进步^[3-4],长春理工大学设计了一款双波段光纤传像系统,能够在可见光和近红外波段内进行图像采集,标志着红外光纤传像技术也在逐步走向成熟^[5]。近年来,中国科学院大学、中国科学院西安光机所对光纤内窥镜的光学系统也进行了相应的深入研究,并取得了显著的成果,但也存在着视场角不足或者尺寸相对偏大的情况^[6-7]。在光导纤维传像束的研发与制造领域,长春光机所、西安光机所、南京春辉都处于国内领先地位。

纤维内窥镜中的光纤传像束是将一定数量的具有相同长度的光纤,按照一定的排列方式,进行集合经固化抛磨后而成的无源器件,质量较轻、可任意角度弯曲、可在复杂的空间中进行图像传输,在医疗、工业、科研、以及航天、军事等各个领域得到了普遍的应用^[8-9]。在纤维式内窥镜的前置光学系统中,物体经过相应的前置物镜将成像于传像束光纤的光线入射端面上,再通过以单根光纤为一个像元的传像束进行图像传输,并且每根光纤

都具有优异的光学绝缘特性,能够单独传输图像且不受相邻光纤的干扰。因此,光纤传像束入射面的图像可看作是通过单根光纤对耦合物镜所成图像进行的独立采样,采样点即是光纤束所组成的像元,像元的尺寸和数目即为采样点的尺寸和数目。传像束2个端面的光纤按照一定排列方式有规律地对应排列,使得两端面的图像基本保持一致。出射面与目镜耦合后可供人眼直接观察,或者在目镜后接转像系统,通过图像设备处理后在显示器上直接观察^[10]。

1 设计原理

部分特殊用途的纤维式医疗内窥镜是从人体狭小的腔道进入人体内后,进行观察、诊断和手术,故对其外形尺寸有一定的限制。其中作为图像传输系统主要组成部分的光纤传像束相比传统的大截面光纤传像束尺寸要小很多,并且要求有较好的成像质量和较大的物镜视场角,因此对前置物镜的结构和尺寸提出了更高的要求。

在纤维式内窥镜物镜的设计过程中,根据其设计要求,分析其光学特性,考虑选用反远距型结构。反远距结构非对称,具有负光焦度的前组透镜对轴外光线进行偏转,使得后组的透镜具有较小的视场角,以此满足超广角的设计要求。一般的光学系统中,孔径光栏有多种放置方式,在反远距型的光学系统中,若将其置于透镜前组,由于过于靠近入瞳,前组透镜无法对轴外光线偏折,导致后组透镜的尺寸增大。为了使前置物镜具有较小的外形尺寸和较轻的质量,一般在后组透镜上放置孔径光栏,构成“负-正”型反远距光学系统^[11]。

由全反射定理可知,当一束光从光密介质中入射到光疏介质的光滑分界面时,入射光与分界面法线的夹角大于或者等于临界角,入射的光束将全部反射到光密介质中。传像束光纤就是根据全反射定律制成的光学纤维,故在纤维式内窥镜物镜光学系统的设计过程中,要保证传像束光纤和入射光线的数值孔径能够相互匹配。如图1所示。目标物AB经过透镜L成像在传像束光纤A'B'处,当传像束的数值孔径角等于物镜光学系统的像方数值孔径角时,对于轴上成像光束AA'而言,AA'的成像光束关于光轴对称且直接入射到光纤的入射面上,轴上光束AA'能够全部进入传像束光纤;但对于轴外光束BB'而言,其成像光束相对

于主光线对称,由于轴外光束 BB' 以 ω' 角度斜入射到传像束光纤的入射面上,轴外光束 BB' 的部分光线不能进入传像束光纤中,造成传像束光纤接受不到这部分光线,导致输出图像的边缘带较暗。且随着视场的增加,其影响更明显。

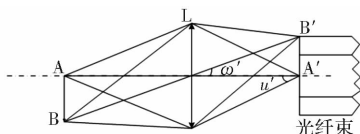


图1 光纤传像束的图像输入

Fig. 1 Image input of imaging fiber bundle

为了保证传像束光纤的图像质量,前置物镜应考虑选用像方远心光路系统^[12],如图2所示。像方主光线与光轴是相互平行的,并且轴外光束 BB' 和轴上光束 AA' 的所有成像光束能够全部进入传像束光纤中传播,使得光纤传像束的输入和输出图像光强分布基本一致,同时保证了像方远心系统轴上和轴外像面照度的均匀性,使得传像束光纤的成像质量得到了提高。

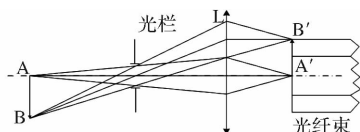


图2 光纤传像束的前置远心光学系统

Fig. 2 Front telecentric optical system of imaging fiber bundle

传像束的极限分辨率是影响传像束光纤成像效果的关键参数之一。根据有关传像束光纤的研究理论可知,传像束单根光纤的端面直径尺寸 d ,传像束单根光纤之间的排列方式与胶合间距都决定着传像束极限分辨率的大小。如图3所示,在制备光纤传像束时常采用正方形或六边形的组合方式。在光纤传像束处于静态时,采用正方形的组合方式,其极限分辨率为

$$\sigma_{\text{正}} = \frac{1}{2d} \quad (0^\circ \text{ 和 } 90^\circ \text{ 方向}) \quad (1)$$

$$\sigma_{\text{正}} = \frac{1}{1.4d} \quad (45^\circ \text{ 和 } 135^\circ \text{ 方向}) \quad (2)$$

采用六边形的组合方式时,其极限分辨率为

$$\sigma_{\text{六}} = \frac{1}{\sqrt{3}d} \quad (0^\circ, 60^\circ \text{ 和 } 120^\circ \text{ 方向}) \quad (3)$$

$$\sigma_{\text{六}} = \frac{1}{d} \quad (30^\circ, 90^\circ \text{ 和 } 150^\circ \text{ 方向}) \quad (4)$$

在确定了光纤传像束的排列结构和单丝直径后,即可计算传像束的最小极限分辨率。为提高

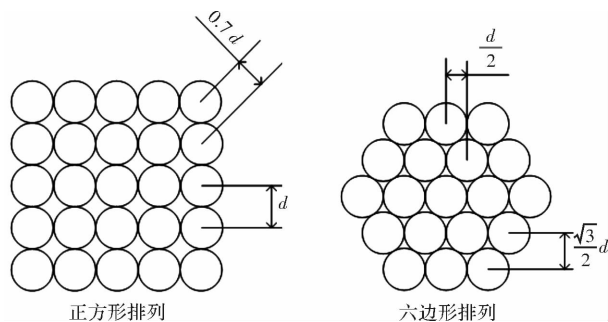


图3 光纤传像束的排列方式

Fig. 3 Arrangement of imaging fiber bundle

传像束的图像质量,需要满足所设计的前置物镜的调制传递函数(MTF)值在此极限分辨率处较高即可。

2 设计实例

根据实际内窥镜的性能需求,特选取外径为 0.64 mm、单丝直径为 $7.5 \mu\text{m}$ 的光纤传像束,该传像束光纤处于静态条件下,按六边形进行排列时,传像束的极限分辨率为 77 lp/mm。故以此光纤传像束为基础设计前置物镜,要求物镜在极限分辨率为 77 lp/mm 处调制传递函数(MTF)值为 0.7,工作波长 $(0.48 \sim 0.65) \mu\text{m}$,物方视场角 $2\omega = 90^\circ$,取物距为 25 mm,由高斯公式可得焦距 $f' = 0.37 \text{ mm}$ 。根据内窥镜实际使用时对尺寸和景深的要求,并且保证传像束的数值孔径不小于前置物镜的像方数值孔径,取相对孔径 $D/f' = 1/4$ 。

目前的技术要求前置透镜的直径不小于 0.5 mm,曲率半径必须超过 0.4 mm,透镜的厚度必须控制在 0.3 mm~0.5 mm,并且边缘厚度和间隔要求要超过 0.15 mm。如图4所示,由4片透镜组成的物镜光学系统即为计算和光学仿真软件优化后得到的结果。在选择透镜的材料时,采用高折射率低色散的 H-ZLaF68 能够使轴上光束和轴外光束的入射角迅速减小,提高相对孔径并增大视场,同时有利于增大玻璃的曲率半径,从而减小高级像差。H-KF6 透镜有利于消色差。此外,在双胶合透镜中采用 H-ZLaF50D 玻璃与重火石 D-ZF94 玻璃相配合。该物镜结构光学总长 3.9 mm,最大横截面直径为 0.95 mm,符合像方远心光路系统的要求。由 Zemax 光学仿真软件可知,物镜像方光线的数值孔径为 0.09,小于传像束光纤数值孔径,符合光纤的全反射定律,故入射的光束能够完全进入光纤传像束。

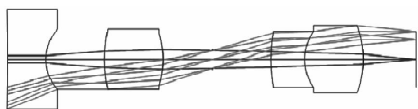


图4 纤维式内窥镜物镜

Fig. 4 Objective lens for fiber-optic endoscope

该光学系统的前组是由1片具有负光焦度的负透镜构成,后组则由1片正透镜和1片双胶合透镜所组成。将具有负光焦度的透镜放在前组能够有效地减小后组的视场角,使得光学系统获得较大的视场。并且前组的负透镜和后组的双胶合透镜对整个光学系统的色差和场曲的校正起到了重要作用。为了形成像方远心光路系统,将孔径光阑放置在双胶合透镜的前焦点处。

如图5所示,前置物镜光学系统的调制传递函数(MTF)曲线是评价光学系统成像质量的主要方法。由图5可知,物镜在奈奎斯特空间频率77 lp/mm处的调制传递函数(MTF)值接近0.7,满足像质要求。

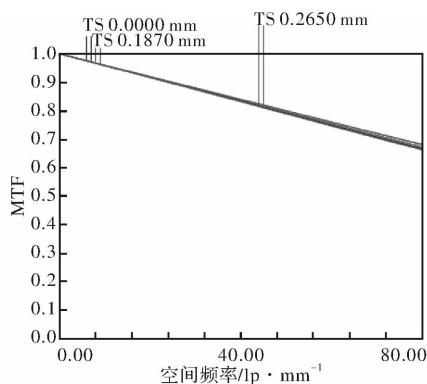


图5 调制传递函数曲线

Fig. 5 Curve of MTF

图6是光学系统的点列图。已知传像束单根光纤的尺寸为 $7.5\text{ }\mu\text{m}$,由点列图看出,该光学系统的最大几何弥散斑半径为 $0.885\text{ }\mu\text{m}$,符合成像质量要求。

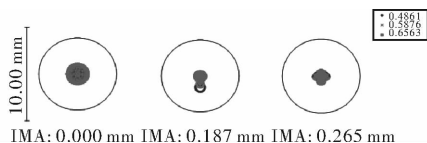


图6 点列图

Fig. 6 Spot diagram

图7是光学系统的能量集中度分布曲线,横坐标和纵坐标分别为像斑直径和能量集中度。由图7可知,95%以上的能量主要集中在直径为 $20\text{ }\mu\text{m}$ 的圆内,90%的能量主要集中在半径 $3\text{ }\mu\text{m}$ 的

圆内。

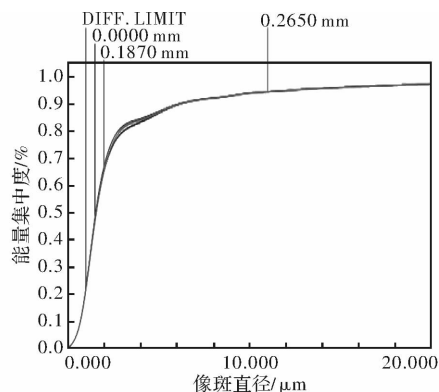


图7 能量集中度曲线

Fig. 7 Curve of encircled energy

由Zemax软件分析可知,轴上和轴外光束在像面上的相对照度分布均匀,满足像方远心光路系统的要求;并且该光学系统在轴外最边缘光线处达到最大畸变,最大畸变为 -18.8% 。为了满足该光学系统的广角性能要求,采用“负-正”型光学结构,必然会产生较大畸变。内窥镜作为观察系统,畸变不会对系统的成像清晰度产生影响,后期可通过图像处理算法对畸变进行校正,以满足最佳的成像质量要求^[13]。

3 结论

光纤传像束作为纤维式内窥镜图像系统中的关键部分,前置物镜的设计要根据传像束光纤的结构和尺寸,以及内窥镜的性能要求来进行。前置物镜首先要满足的是光纤的全反射条件,选用“负-正”型像方远心系统,保证了前置物镜光学系统的大视场、小尺寸和像面均匀性。在物镜结构中使用双胶合透镜对光学系统的像差进行校正,提高了前置物镜的成像效果。通过本文的设计实例表明,该设计思路可行。

参考文献:

- [1] 李东源, 阎秀生, 张晓光, 等. 传像光纤束的物镜设计[J]. 激光与红外, 2005, 35(9): 697-699.
LI Dongyuan, YAN Xiusheng, ZHANG Xiaoguang, et al. The receiving lens design of image guide fiber bundle[J]. Laser & Infrared, 2005, 35(9): 697-699.
- [2] 陈月存, 唐勇. 光纤传像束的物镜设计[J]. 应用光学, 2009, 30(1): 110-113.
CHEN Yuecun, TANG Yong. Objective lens design of fiber image-transmitting bundle[J]. Journal of Applied Optics, 2009, 30(1): 110-113.

- [3] 孔德鹏,王丽莉,贺正权,等. 新型聚合物传像光纤制作方法探索[J]. 中国激光, 2013, 40(1):153-157.
KONG Depeng, WANG Lili, HE Zhengquan, et al. Developement of the fabrication method for novel polymer imaging fiber[J]. Chinese Journal of Lasers, 2013, 40(1):153-157.
- [4] 祝清德,王训四,聂秋华,等. 红外硫系光纤传像束研究进展[J]. 硅酸盐通报, 2014, 33(11):2873-2880.
ZHU Qingde, WANG Xunsi, NIE Qiuhua, et al. Research progress of infrared chalcogenide optical fiber imaging bundles[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2014, 33(11):2873-2880.
- [5] 佟建,向阳,董萌,等. 双波段光纤内窥镜物镜设计[J]. 应用光学, 2014, 35(5):779-784.
TONG Jian, XIANG Yang, DONG Meng, et al. Objective design of dual-waveband endoscope with image fiber bundles[J]. Journal of Applied Optics, 2014, 35(5):779-784.
- [6] YAN Xingtao, YANG Jianfeng, XUE Bin, et al. Design of the objective lens for endoscope with imaging fiber bundle[J]. Infrared and Laser Engineering, 2013, 42(2):423-427.
- [7] LYU J, XUE B, LI T, et al. Optical system design of subminiature endoscope with imaging fiber bundle [C]// International symposium on optoelectronic technology and application. New York: International Society for Optics and Photonics, 2016.
- [8] DORONINAAMITONOVA L V, FEDOTOV I V, FEDOTOV A B, et al. High-resolution wide-field Raman imaging through a fiber bundle[J]. Applied Physics Letters, 2013, 102(16):337-355.
- [9] 崔媛,周德春,于凤霞,等. 酸溶法光纤传像束材料匹配性设计[J]. 光子学报, 2011, 40(2):186-189.
CUI Yuan, ZHOU Dechun, YU Fengxia, et al. Matching design of optical fiber image bundle by acid-leaching technique[J]. Acta Photonica Sinica, 2011, 40(2):186-189.
- [10] 徐明泉. 光纤传像束的传光特性表征[J]. 光纤与电缆及其应用技术, 1997(5):22-23.
XU Mingquan. Characterization of transmission property of optical fiber image bundle[J]. Optical Fiber & Electric Cable & Their Applications, 1997(5):22-23.
- [11] 谷俊达,向阳. 电子内窥镜光学系统设计[J]. 长春理工大学学报:自然科学版, 2015(2):18-20.
GU Junda, XIANG Yang. Optical system design of electronic endoscope[J]. Journal of Changchun University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2015(2):18-20.
- [12] 郁道银,谈恒英. 工程光学[M]. 北京:机械工业出版社, 2008.
YU Daoyin, TAN Hengying. Engineering optics[M]. Beijing: China Machine Press, 2008.
- [13] 曹佃生. 广角镜头畸变测量及校正方法研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2015(8):1210-1215.
CAO Diansheng. Distortion measurement and correction method of wide-angle lens[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2015(8):1210-1215.