

大靶面、长工作距高清工业内窥镜设计

杨凯明, 向阳*, 王鑫, 张进, 刘林, 侯明旺

长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022

摘要 针对传统硬性工业内窥镜在炉窑内部监测视野小、分辨能力低和工作距离短的问题,设计一种大靶面、长工作距的高清工业内窥镜。采用一体化设计思路,设计内容包含广角像方远心物镜系统和对称式消像差棒镜中继系统。所设计的高清工业内窥镜的光学 F 数为6、视场角为 103° 、光学长度为1040 mm、光学外径不大于26 mm、靶面对角线长度为16 mm、系统像方远心度不大于 1.8° ,且调制传递函数不小于 $0.2@160$ lp/mm。实验结果显示,所设计的工业内窥镜在40 cm至无穷远范围内可清晰成像,并且在5 m远处可分辨10 mm的线对宽度,角分辨率为 8.73 C/ $^\circ$ 。该内窥镜的设计优势:系统的接收器靶面尺寸大,物方分辨率高;对称式消像差棒镜中继系统的延展性好,光通量高;物像以远心的形式衔接,光线传播平滑,像面照度均匀。

关键词 光学设计; 工业内窥镜; 中继系统; F 数

中图分类号 TH776

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.2222001

Design of High-Definition Industrial Endoscope with Large Optical Format and Long Working Distance

Yang Kaiming, Xiang Yang*, Wang Xin, Zhang Jin, Liu Lin, Hou Mingwang

School of Opto-Electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, Jilin, China

Abstract In terms of the problems of the traditional rigid industrial endoscope, such as small monitoring field, low resolution, and short working distance in the furnace, a high-definition industrial endoscope with large optical format and long working distance is designed. The integrated design is adopted, and it includes an image telecentric objective system with wide angle and a symmetric aberration elimination relay system with the rod lens. The high-definition industrial endoscope is designed as follows. Its optical F -number is 6, the field of view is 103° , the optical length is 1040 mm, the optical outside diameter is not more than 26 mm, the target diagonal is 16 mm, the system image telecentricity is not more than 1.8° and the modulation transfer function is not more than $0.2@160$ lp/mm. Experimental results show that the designed industrial endoscope can obtain a clear image in the range from 40 cm to infinity and can resolve the line pair width of 10 mm at a distance of 5 m, with an angular resolution of 8.73 C/ $^\circ$. The endoscope has advantages in view of design. Specifically, its receiver target surface is large, and the object resolution is high. The symmetric aberration elimination relay system with the rod lens has good ductility and high luminous flux. Objects and images are connected in telecentric form, with smooth light transmission and uniform illumination on the image surface.

Key words optical design; industrial endoscope; relay system; F -number

1 引言

工业硬性内窥镜被广泛应用于玻璃厂、钢铁厂、垃圾焚烧厂、热电厂、冶金厂和石油化工厂等工厂的高温炉窑内部监测中,以评估高温炉窑的工作效果。早期工业硬性内窥镜在高温黑暗环境中无法使用,国内厂家设计了拥有冷凝系统的套管结构,有效解决了高温

问题。为了解决黑暗环境的照度问题,研究人员研制了自带光源的内窥镜系统,但照明光能利用效率不高,大范围内的背光效果差^[1-2]。中南大学团队研制了一款平行低光损背光工业内窥镜,该系统自带照明系统,并采用了延展性很好的光纤传像束,但光纤传像束不能校正任何像差,故系统分辨率也受限于光纤的直径^[3]。安徽大学团队采用传统中继系统设计了一款视

收稿日期: 2022-04-20; 修回日期: 2022-05-22; 录用日期: 2022-06-04

通信作者: *xycom@163.com

场为 102° 、长度为 730 mm、光学口径为 22 mm、调制传递函数(MTF)不小于 $0.4@50 \text{ lp/mm}$ 的广角工业内窥镜,但传统中继系统设计方法限制了器件整体的长度。同时,选用靶面对角线尺寸为 6 mm 的电荷耦合器件(CCD),其靶面对角线长度为 6 mm,物方分辨率较低^[4]。常州亚宾电子有限公司研制了 AXC35 变焦内窥镜镜头,其视场角为 $17^\circ\sim 81^\circ$,光学外径为 25 mm,系统长度可以定制为 100~1500 mm。利用工业内窥镜来监测大型炉窑,不仅要求工业内窥镜具有较高的分辨率,还对工业内窥镜的长度与视场角有较高的要求。分析比对工业内窥镜的设计思路与设计参数,选用 2.54 cm 的图像传感器(对角线长度为 16 mm),设计一款视场角不小于 100° 、长度不小于 1 m 的高清工业内窥镜。

2 设计原理及参数确定

2.1 总体原理

工业内窥镜的设计原理与医用视频硬性内窥镜有

着相似之处,医用视频硬性内窥镜设计主要涉及反远距物镜设计、3~5 组双远心中继系统设计和目镜设计^[5-7]。三个子系统严格控制传输光线的远心度,再进行物像结合,最后以平行光束出射。严格控制远心的意义在于有效控制内窥镜光学口径,光学系统衔接后像质变化不明显,且像面照度均匀性好^[8-9]。值得注意的是,医用内窥镜目镜设计目的是方便人眼观看,而工业内窥镜的终端是图像传感器,出射光束应该为聚焦光束,如果参照医用内窥镜的设计思路,系统要在图像传感器上显示图形,还需要设计适配器系统^[10]。本文参照医用内窥镜成像原理,舍弃医用内窥镜的目镜与适配器系统,直接选用物镜系统与中继系统双系统成像的方法,原理如图 1 所示。其中,IMG 为像面。系统物面在无穷远处,平行光束进入内窥镜的反远距物镜中,在物镜后焦面上形成一次像面,再通过三组相同的对称式中继系统,最终光线聚焦在第三组中继系统的后焦面上。

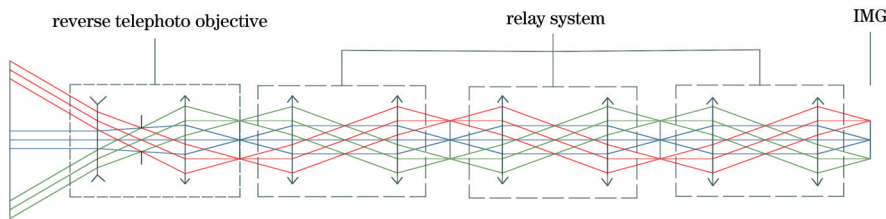


图 1 系统原理图

Fig. 1 Principle diagram of system

虽然工业内窥镜与医用内窥镜在原理及外形上有着相似之处,但是工业内窥镜的光学设计问题不是单纯的光学尺寸等比放大问题,因为在相同的相对孔径与视场角的情况下,初级球差与光线入射高度的平方成正比,初级像散与物高的平方成正比,而初级畸变与物高的三次方成正比^[11]。由于工业内窥镜的孔径大于医用内窥镜,故系统轴外点像差也会被正向放大,进而会导致像差校正困难。

对系统原理分析可知,舍去目镜与适配器系统,整体的加工难度与加工成本下降,但系统光学长度会缩短,像质优化变量数目会减少,故需要设计一款延展性好、成像质量高的中继系统。中继系统的对称式结构可自动消除垂轴像差(彗差、畸变和倍率色差),但会使轴向像差(球差、场曲、像散和位置色差)放大一倍,故设计对称式中继系统时需要系统的轴向像差进行严格的控制。整体系统的主要像差消除任务要由物镜系统来承担,故设计时应该合理选择物镜的结构与材料,以减少像差影响,并通过整体优化来平衡系统的像差。

2.2 设计参数确定

本文拟定的高清工业内窥镜的基本光学参数为:视场角为 103° 、长度为 1000 mm、最大外径为 26 mm,并且在 5 m 远处可以分辨 10 mm 大小的物体。光学系统后的截距需满足图像传感器接口距离与系统像面调焦距离的要求,将其设定为大于 25 mm。炉窑属于密闭空间,在照度条件不足时,为实现较高的物方分辨率

与图像灵敏度,选用靶面对角线尺寸为 16 mm 的黑白相机。由于对称式中继系统的放大倍率为 -1 ,当系统满屏显示时,内窥镜前组物镜系统的半像高应为 8 mm。广角系统的视场角、焦距与像面高度的关系^[12]为

$$f\omega = h_1, \quad (1)$$

式中: f 为光学系统的焦距; ω 为半视场角,单位为 rad; h_1 为广角系统的半像高。通过式(1)计算得到物镜焦距为 8.9 mm,可通过焦距值来控制系统像高。光学系统的视场角、焦距和像面高度的近轴关系公式,以及光学畸变的表达式分别为

$$f \tan \omega = h_2, \quad (2)$$

$$q' = \frac{Y'_z - y'}{y'} \times 100\%, \quad (3)$$

式中: q' 为系统边缘畸变值; Y'_z 为实际边缘视场主光线高度; y' 为近轴边缘视场主光线高度; h_2 为近轴像面高度。近轴像面高度 h_2 等于近轴边缘视场主光线高度 y' ,结合式(2)和式(3)可得系统实际边缘主光线高度、视场角和畸变间的关系为

$$Y'_z = (1 + q') f \tan \omega. \quad (4)$$

由式(4)可知,实际边缘视场主光线高度(近似于实际像高)由视场角、焦距和畸变共同控制,由于系统畸变设计时未知,故使用 DMVA 操作数控制实际像面高度较为合理,式(1)计算的焦距可以作为参考值。由

系统放大倍率关系可以求出系统像方分辨率,即

$$\beta = \frac{\epsilon'}{\epsilon} = \frac{Y'}{Y}, \quad (5)$$

式中: β 为光学系统放大倍率; ϵ' 为像面最小可分辨率线对距离; ϵ 为物面最小可分辨率线对距离; Y' 为像面高度; Y 为物面高度。由式(5)可知,物面最小可分辨率线对距离 ϵ 与像面高度 Y' 成反比,故系统靶面尺寸越大,所设计的工业内窥镜的物方分辨率越高。计算得到的系统放大倍率为0.00127,物方最小可分辨率线对距离为10 mm,像方最小可分辨率线对距离为12.7 μm ,此时系统的MTF值在78.7 lp/mm处大于0.2即可。光学系统像方分辨率与 F 数的关系公式为

$$\epsilon' = 1.22\lambda F, \quad (6)$$

式中: λ 为波长; F 为系统相对孔径的倒数。D光波长为0.587 μm ,计算可知,系统的 F 数需小于17.7。对于物距为无穷远的光学系统来说,中心视场像面照度的公式为

$$E' = \frac{\pi KL}{4F^2}, \quad (7)$$

式中: E' 为像面的光照度; K 为光学系统的光能透过率; L 为物面的光亮度。由式(7)可知,光学系统的 F 数越小,像面光照度越强,探测器所呈现的图像越明亮。降低系统 F 数不仅有助于提升系统的光学性能,还可以克服低照度环境的影响。因此,本设计拟定 F 数为6,系统的MTF不小于0.2@150 lp/mm,系统在完善成像条件下理论像方分辨率为4.297 μm ,物方分辨率为3.38 mm。

为计算系统的像面照度,使用黑夜背景(光亮度值不小于 $5 \times 10^{-2} \text{ cd/m}^2$)模拟暗环境,系统光能透过率 K 包含了材料内部吸收损失与透射面的反射损失。当只考虑材料内部吸收损失时,可见光在使用的玻璃材料中每通过10 mm厚度的吸收损失小于0.5%,故800 mm厚的玻璃的透过率高于67%。当只考虑透射面的反射损失时,透镜两面镀增透膜,单片透镜的反射损失可小于2%,故由25片透镜组成的系统的透过率高于60.3%。因此,整体系统的光能透过率 K 在40.4%以上,代入式(7)中,计算得出系统的最低像面照度为 $4.4 \times 10^{-4} \text{ lx}$,该像面照度值可被低照度($3 \times 10^{-4} \text{ lx}$)黑白相机探测到。

中继系统为双远心系统,放大倍率为-1,只需要控制中继系统整体口径小于26 mm,单组长度大于320 mm,且轴向像差消除良好即可。为确保物镜系统与中继系统远心衔接,要求物镜的像方远心度小于 2° 。综上分析,系统总体设计参数如表1所示,其中BFL为光学后焦点。

3 光学系统设计

3.1 广角像方远心物镜设计

内窥镜物镜光学设计采用反远距镜头设计思路,物镜前组为焦距为负的透镜组,发散光线可获得较大的视场角,后组为焦距为正的透镜组,校正像差并可获

表1 系统设计参数

Parameter	Value
Total length /mm	≥ 1000
Diameter /mm	≤ 26
Field angle /($^\circ$)	103
Wavelength / μm	0.486-0.656
Working distance /mm	5000
F Number	6
Focal length of objective /mm	8.9
Image height /mm	8
Chief ray angle /($^\circ$)	≤ 2
BFL /mm	≥ 25
MTF	$\geq 0.2@150 \text{ lp} \cdot \text{mm}^{-1}$

得较大的相对孔径,整体结构具备大视场角和长后截距的特点^[13-14]。常见的反远距结构前组为单片负透镜,后组为天塞正透镜组,光阑位置处于后组透镜之间或者透镜前。因为系统视场角大于 100° ,故属于广角设计范畴。选用的初始结构如图2所示^[15],其中STO为光阑。

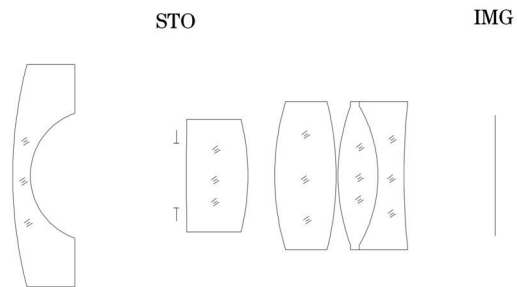


图2 物镜初始结构

Fig. 2 Initial structure of objective lens

设计时打开光线瞄准功能,系统通过选择光线充满光阑来修正光瞳像差。初始结构中第一片镜子的口径较大,为了减少内窥镜整体的口径,在前组中增加一片保护透镜,将其材料设为具有高折射率、低色散的蓝宝石(折射率为1.768,阿贝数为71.7)。为了修正系统轴向像差,对后组中第二片透镜进行拆分胶合处理。

内窥镜物镜优化内容主要包含像高、远心度、口径、厚度和后截距。先设置光斑半径优化评价函数,添加系统结构操作数DMVA、RAID、TTHI,初步优化后使用Zemax的锤型优化功能。然后,将优化评价函数设置为波前优化,添加像差操作数。最后,反复优化调节。物镜初步设计结果如图3所示,其中系统视场角为 103° 、 F 数为6、总长为63 mm、最大口径为18 mm、像面高度为8 mm、MTF不小于0.2@140 lp/mm、出射光主光线角度不大于 2° 。

3.2 对称式消像差棒镜中继系统设计

内窥镜中继系统的机械作用为延长工作长度,使

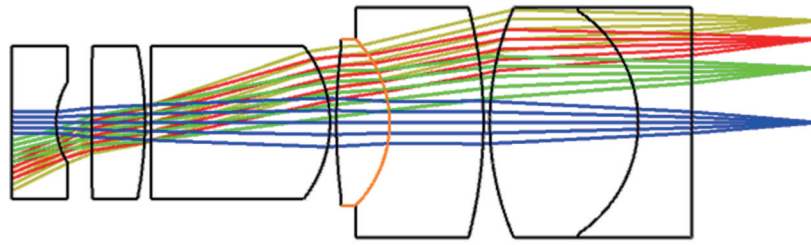


图 3 物镜初步优化结果

Fig. 3 Preliminary optimization result of objective lens

观察者可以摆脱观察条件的限制,光学作用为中转光线,使物镜所成的像以一定的倍率传输到图像传感器的光敏面上。内窥镜中继系统的演变如图 4 所示^[16-17],从上至下分别为传统双胶合中继系统、Hopkins 双胶合棒镜系统和 Hopkins 三胶合棒镜系统:传统双胶合中继系统的优点在于透镜加工简单,但系统在口径受

限的情况下,系统共轭距短,轴向像差无法校正;Hopkins 双胶合棒镜系统虽然共轭距有所增加,但是棒镜非胶合面曲率较大,难加工;Hopkins 三胶合棒镜系统具有长度长、曲率易加工和可以校正轴向色差的优点,但无法校正场曲。其中,OBJ 为像面。

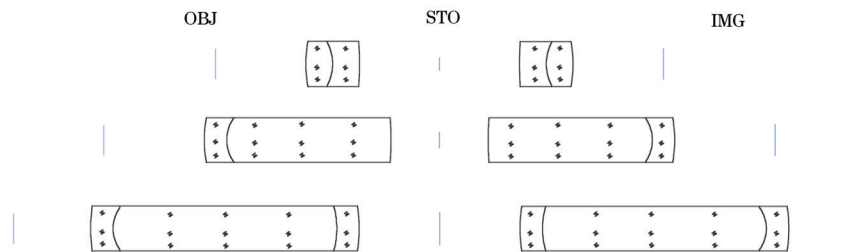


图 4 中继系统演变

Fig. 4 Relay system evolution

Hopkins 棒镜系统设计原理如图 5 所示,其中:虚线为纯空气介质情况下中继系统中光线的传播路径,入射光线孔径角为 U_1 ;实线为存在棒镜的中继系统中光线的传播路径,入射光线孔径角为 U_2 。当光线从光疏介质进入光密介质时,出射角度会减小,故棒镜中继系统不仅对口径有着限制作用,而且 $\sin U_2 > \sin U_1$,即光学系统数值孔径较大,这有助于提升内窥镜的

光学分辨率与光通量。传统双胶合中继系统中传播介质以空气为主,故 Hopkins 棒状镜相较于传统双胶合中继系统,具有优异的延展性、优异的轴向像差校正能力、较高的光通量和较强的光学性能。此外,当将棒镜结构作为内窥镜的中继系统时,棒镜的整个长度可以用于内窥镜系统的像差校正,这可使得硬性内窥镜具有优越的成像性能。

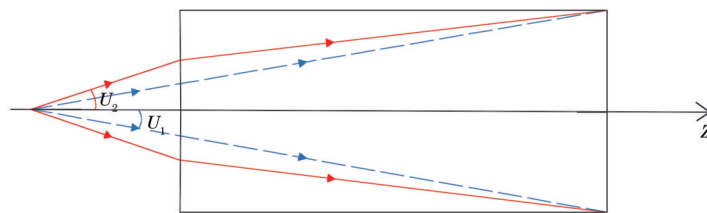


图 5 棒镜设计原理

Fig. 5 Design principle of rod lens

在棒镜中继系统设计时,由物镜系统的像面信息可确定棒镜中继系统的物高为 8 mm,数值孔径为 0.085。系统的具体设置:设置物方远心功能,并添加像方远心度操作数 RAID;添加轴向像差操作数 SPHA、FCGS、FCGT 来控制系统的球差、子午场曲、弧矢场曲和像散,其中像散为子午场曲与弧矢场曲的差值;添加长度操作数 TTHI 来控制棒镜系统的长度。设计时需要注意光线在玻璃内部的传播角度,防止光

线在透镜与套筒内壁之间发生全反射,产生杂散光。

为校正中继系统场曲,提出一种棒镜加胶合透镜的对称式结构,其中棒镜材料为 H-K9L,双胶合透镜的胶合面为平面,系统整体加工工艺简单,加工成本低廉。同时,该对称式系统对轴向像差有着较好的校正效果。中继系统设计结果如图 6 所示。

3.3 内窥镜一体化设计

内窥镜一体化设计有利于物镜系统与棒镜中继系

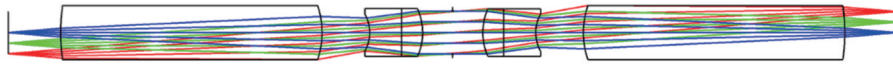


图 6 中继系统设计结果

Fig. 6 Design result of relay system

统的像差综合校正^[18]。将设计好的物镜与三组棒镜进行物像衔接,此前的远心控制可保证光线的平滑传播。由于棒镜系统的物面高度为 8 mm,是一般医用内窥镜的 4~8 倍,故单组棒镜的像差并没有被完全校正,在与三组棒镜和物镜拼接以后,像质将大幅降低。一般为方便隔圈加工,三组棒镜间隔均保持一致,本设计将三组棒镜之间的间隔设置为优化变量,这样便能在优化的过程中有效提升像质。值得注意的是,内窥镜物镜与三组棒镜衔接后会产生三次中间像,对此类光学系统进行优化时,应使用间隔操作数 TTHI 控制像面到镜子表面的距离,因为距离过小,内窥镜在调试过程

中会观察到镜片加工导致的表面疵病,这会影响到成像质量。在优化过程中,使用角度操作数 RAID 控制像面光线远心度,确保图像传感器接收的像面照度均匀。使用结构操作数 MNCA、MNEA、MNCG、MNEG 和 CVVA 控制空气与玻璃的中心厚度、空气与玻璃的边缘厚度和透镜的曲率,确保机械结构的可加工性。使用光斑半径与波前两种优化方法进行反复优化调节后得到的设计结果如图 7 所示。此时,系统表面均为标准球面,光学长度为 1040 mm,总体口径不大于 26 mm,焦距为 -10 mm, F 数为 6,后截距为 40 mm,且像方远心度不大于 1.8°。

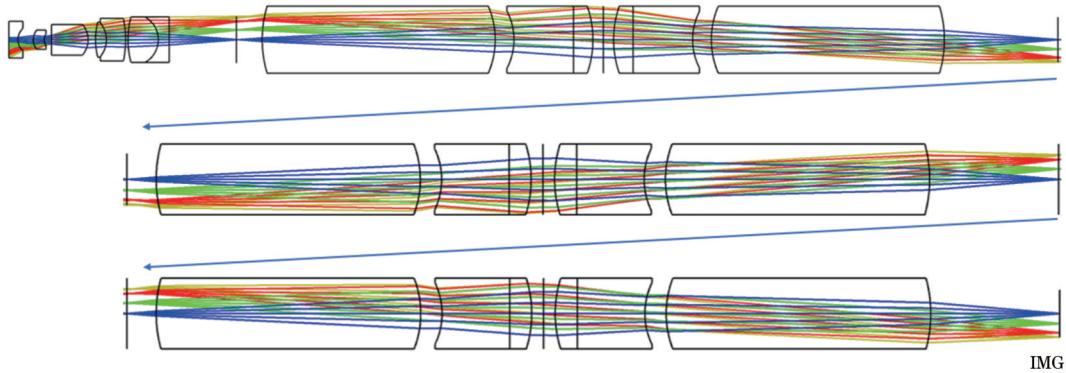


图 7 一体化设计结果

Fig. 7 Integrated design result

3.4 像质分析

工业内窥镜的 MTF 如图 8 所示,所设计的高清工业内窥镜的 MTF 值在 160 lp/mm 处大于 0.2。由曲线也可以看出,系统像差校正良好,各视场解析度高,满足分辨要求。

系统畸变如图 9 所示。可以发现:当视场角为 40° 时,畸变值为 -5.63%;当视场角为 70° 时,畸变值为 -17.6%;当视场角为 103° 时,畸变达到最大值

(-36.4%)。中心视场畸变值较小,边缘视场畸变较大,对实际的观测效果影响较小。

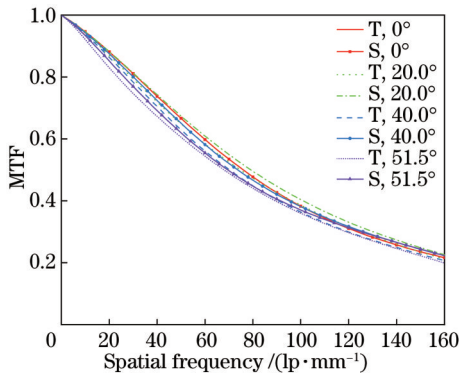


图 8 调制传递函数

Fig. 8 Modulation transfer function

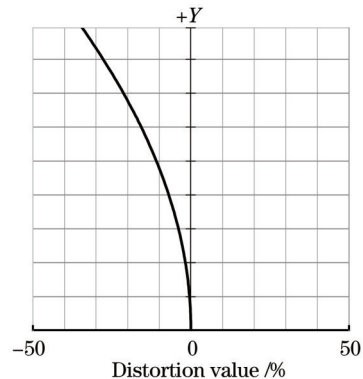


图 9 畸变图

Fig. 9 Distortion diagram

系统横向像差如图 10 所示。内窥镜光学系统在 0.8° 视场内,各种像差校正良好,边缘视场中 F、D、C 光曲线距离较大,存在色差。横向像差图的纵坐标是不同孔径的光线相对于主光线在像面的横向偏差表示系统色差特性,不能量化,所以需要在 Zemax 中读取

数值。系统所有波长的垂轴色差在 $-1.82 \sim 0.98 \mu\text{m}$ 范围内。F 光和 C 光的轴向色差在 $-11 \sim 83 \mu\text{m}$ 范围

内,其中孔径中心的轴向色差为 $-11 \mu\text{m}$,孔径边缘的轴向色差为 $83 \mu\text{m}$,均小于一倍焦深 ($84.7 \mu\text{m}$)。

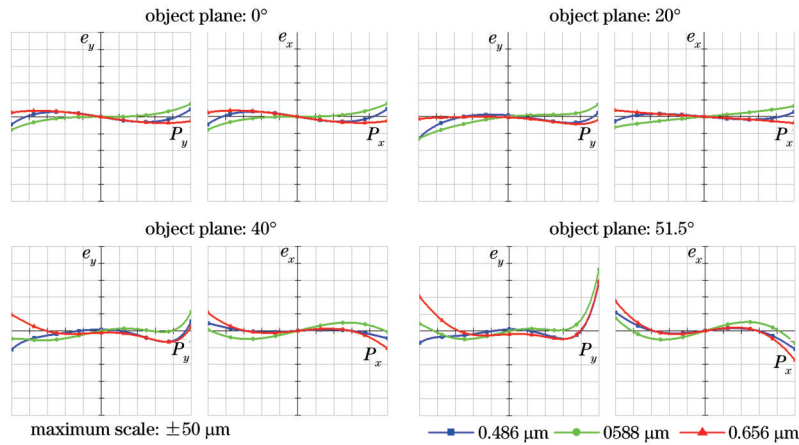


图 10 横向像差图

Fig. 10 Transverse aberration diagram

4 实验分析

实际装调后的高清工业内窥镜测试装置如图 11 所示,主体包括高清工业内窥镜、内窥镜支架、分辨率测试卡、靶面对角线尺寸为 16 mm 的黑白相机和显示系统。使用内窥镜分别对 40、50、70、100 cm 处的分辨率测试卡进行近端成像实验,通过螺纹调焦获得最佳像面,观察视场中心垂直方向排列的线对。近端成像实验效果如图 12 所示,内窥镜系统可对视场内的物体清晰成像,对竖向排列线对进行图像数字放大。可以发现:系统在 40 cm 处能分辨序号 2 下第 3 根黑线,线宽为 1.3 mm,对应物方分辨率为 0.77 lp/mm;系统在 100 cm 处能分辨序号 1 下的第 1 根黑线,线宽为 3.0 mm,对应物方分辨率为 0.33 lp/mm。

在近端成像实验后,对内窥镜进行 1~5 m 远端成像实验,每间隔 1 m 拍摄一张图像,并对图像进行数字

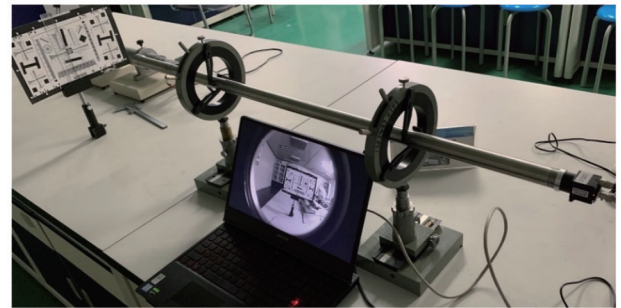


图 11 内窥镜实物图

Fig. 11 Physical diagram of endoscope

放大,成像效果如图 13 所示。图 13 中自制分辨率卡上的线对宽度从上往下依次为 5、10、15 mm。可以发现:系统在 1 m 处可清晰分辨 5 mm 线宽,物方分辨率不小于 0.2 lp/mm;系统在 3 m 处可清晰分辨 10 mm 线宽,物方分辨率不小于 0.1 lp/mm;系统在 5 m 处依旧可以

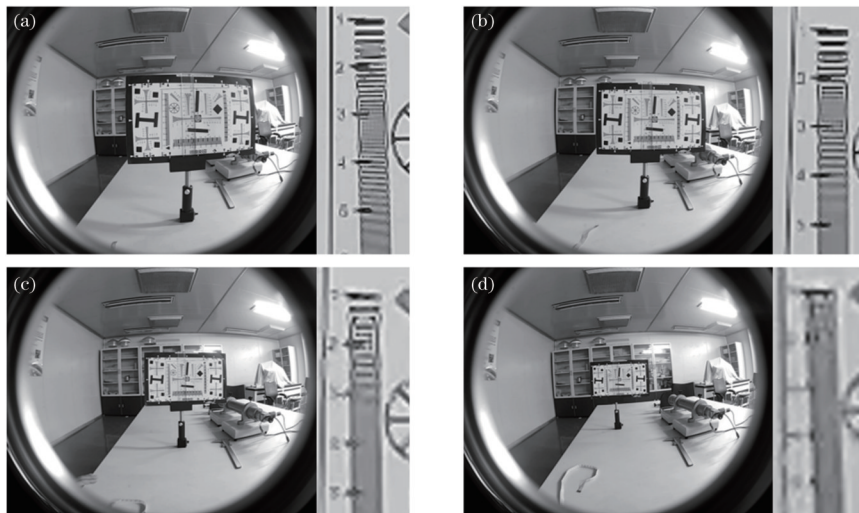


图 12 不同距离处内窥镜近端成像效果。(a) 40 cm; (b) 50 cm; (c) 70 cm; (d) 100 cm

Fig. 12 Endoscopic proximal imaging effect at different distances. (a) 40 cm; (b) 50 cm; (c) 70 cm; (d) 100 cm

分辨 10 mm 线宽,物方分辨率为 0.1 lp/mm,此时角分辨率为 8.73 C/(°)。通过实验分析可知,本文设计的

大靶面、长工作距的高清工业内窥镜在 40 cm 至无穷远范围内分辨效果良好,达到了设计目的。

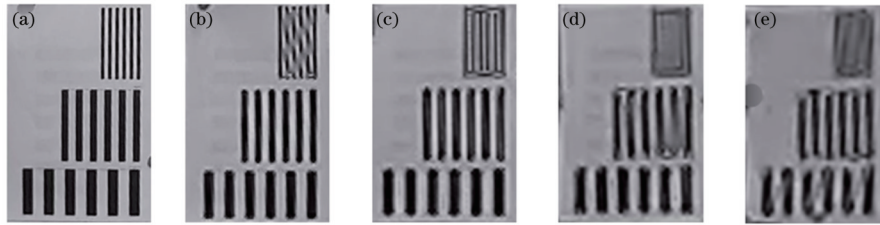


图 13 1~5 m 范围内内窥镜远端分辨效果。(a) 1 m; (b) 2 m; (c) 3 m; (d) 4 m; (e) 5 m

Fig. 13 Endoscopic distal resolution effect in range of 1-5 m. (a) 1 m; (b) 2 m; (c) 3 m; (d) 4 m; (e) 5 m

5 结 论

从内窥镜成像原理出发,提出了一种广角像方远心物镜和对称式消像差棒镜中继系统的设计方法。同时,采用远心的物像衔接方式,设计加工了一种大靶面、长工作距的高清工业内窥镜,相关设计参数与设计方法可以为国内工业内窥镜设计提供参考。结果显示,调焦后系统在 40 cm 至无穷远处可清晰成像,具有高分辨率与高亮度的特点,可满足监测环境的需求。

参 考 文 献

- [1] 刘益林. 便携式高温内窥镜: CN104199183A[P]. 2014-12-10.
Liu Y L. Portable high temperature endoscope: CN104199183A[P]. 2014-12-10.
- [2] 蒋朝辉, 陈致蓬, 桂卫华, 等. 平行低光损背光高温内窥镜下的高炉全料面光学成像系统: CN103667563B [P]. 2015-07-15.
Jiang Z H, Chen Z P, Gui W H, et al. Optical imaging system of blast furnace surface under parallel low light loss backlight high temperature endoscope: CN103667563B[P]. 2015-07-15.
- [3] Chen Z P, Jiang Z H, Gui W H, et al. A novel device for optical imaging of blast furnace burden surface: parallel low-light-loss backlight high-temperature industrial endoscope[J]. IEEE Sensors Journal, 2016, 16(17): 6703-6717.
- [4] 葛玉德, 吴海滨, 胡明勇, 等. 一种长工作距广角工业内窥镜镜头的设计[J]. 量子电子学报, 2021, 38(6): 815-822.
Ge Y D, Wu H B, Hu M Y, et al. Design of a long working distance wide-angle industrial endoscope lens[J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 2021, 38(6): 815-822.
- [5] 王烨菲. 小口径高分辨率 30° 视向角耳内窥镜设计[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019: 17-39.
Wang Y F. Design of small-caliber high-resolution otoscopy with 30° viewing angle[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019: 17-39.
- [6] 高丰. 全高清腹腔镜系统设计[D]. 长春: 长春理工大学, 2019: 22-42.
Gao F. Design of full HD laparoscopic system[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2019: 22-42.
- [7] 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.
Yu L, Cheng D W, Zhou W, et al. Optimization design of rigid endoscope with high definition and large depth of field[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(11): 1122003.
- [8] 邓强, 李升辉. 高分辨率像方远心连续变焦投影镜头的设计[J]. 红外与激光工程, 2019, 48(11): 213-220.
Deng Q, Li S H. Design of high-resolution image square telecentric continuous zoom projection lens based on TIR prism[J]. Infrared and Laser Engineering, 2019, 48(11): 213-220.
- [9] 闫兴涛, 杨建峰, 薛彬, 等. 利用光纤传像束的内窥镜物镜设计[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(2): 423-427.
Yan X T, Yang J F, Xue B, et al. Design of the objective lens for endoscope with imaging fiber bundle[J]. Infrared and Laser Engineering, 2013, 42(2): 423-427.
- [10] Takahashi S. Illumination optical system for endoscope, optical adapter for endoscope, and optical element: US20220031145[P]. 2022-02-03.
- [11] 张以谟. 应用光学[M]. 4 版. 北京: 电子工业出版社, 2015: 199-203.
Zhang Y M. Applied optics[M]. 4th ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2015: 199-203.
- [12] 陈建发, 潘枝峰, 王合龙. 超大视场红外光学镜头设计[J]. 红外与激光工程, 2020, 49(6): 20190443.
Chen J F, Pan Z F, Wang H L. Design of infrared optical lens with large field of view[J]. Infrared and Laser Engineering, 2020, 49(6): 20190443.
- [13] 黄锦媛, 贺艳芳, 林峰. 基于 Zemax 的双视场胶囊内窥镜设计[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(18): 181701.
Huang J X, He Y F, Lin F. Dual-field capsule endoscope design based on Zemax software[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(18): 181701.
- [14] 张伟, 牛春阳, 游兴海, 等. 高倍率大视场细胞内窥镜成像系统研究[J]. 光学学报, 2021, 41(17): 1717001.
Zhang W, Niu C Y, You X H, et al. Endocytoscopic imaging system with high magnification and large field of view[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(17): 1717001.
- [15] 宋非君, 陈笑, 刘畅. 近代光学系统设计概论[M]. 北京: 科学出版社, 2019: 355-366.
Song F J, Chen X, Liu C. Introduction to modern optical system design[M]. Beijing: Science Press, 2019: 355-366.

- [16] Tomkinson T H, Bentley J L, Crawford M K, et al. Rigid endoscopic relay systems: a comparative study[J]. *Applied Optics*, 1996, 35(34): 6674-6683.
- [17] 牡丹瑶. 一种转像镜组及使用此转像镜组的硬管内窥镜转像系统: CN105445926A[P]. 2016-03-30.
Du D Y. An image transfer system of rigid tube endoscope using the image transfer system of rigid tube endoscope: CN105445926A[P]. 2016-03-30.
- [18] 张树青, 王庆晨, 智喜洋, 等. 30°视向角硬质内窥镜光学设计[J]. *光学学报*, 2018, 38(2): 0222002.
Zhang S Q, Wang Q C, Zhi X Y, et al. Optical design of rigid endoscope with 30° viewing angle[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(2): 0222002.