

文章编号:1004-4213(2010)10-1780-6

# 基于梯度折射率透镜的管道内窥镜设计

郭俊,马永利,张璐,赵翠玲,王文生

(长春理工大学 现代光学测试实验室,长春 130022)

**摘要:**针对管道测试的需求,将梯度折射率透镜的光学性能与显微镜相结合,设计了具有大景深的管道内窥镜光学系统.在保证所需放大倍率的同时,利用梯度折射率透镜介质折射率渐变的特点,使该系统的景深增大为原来的 200 倍.该系统像面近似球面的特点使其更适合圆形管道内壁的检测,当它与 CCD 等器件相结合,不仅实现管道内窥镜的数字化测试,而且能通过监视器在更大景深范围内、方便的监测管道内壁的裂痕、磨损等清晰的图像.

**关键词:**内窥镜;梯度折射率透镜;显微镜;大景深

**中图分类号:**TH741

**文献标识码:**A

**doi:**10.3788/gzxb20103910.1780

## 0 引言

管道内窥镜凭借其体积小、结构灵活的特点,已经广泛应用于各种管道设备的生产、检测及日常检测和维护中.它作为一种无损检测设备,有效延长了人眼的视距,突破了人眼观察的死角,可以准确、清晰地观察管道设备内部或零件内表面的情况,如磨损、表面裂纹等,避免了不必要的设备拆卸以及零部件损伤,具有操作方便,检查效率高,结果客观准确的优势,是管道设备检测的一个有力工具.

显微镜是管道内窥镜的重要组成部分.由于显微系统的景深很小,对具有一定厚度的物体成像得到的图像中只有部分细节良好聚焦,其他部分则是模糊的.一般情况,当显微镜的放大倍率越大,测试准确度越高,其景深也就越小.

大景深对成像系统而言意味着同一画面中有更多的清晰景物,更多的可测控、监控对象.自 20 世纪 60 年代由 Welford 提出环形孔径增大景深方法以来,又出现了很多其他的方法<sup>[9]</sup>,如二维成像序列的图像融合、特殊设计透镜结合图像处理<sup>[10]</sup>等.但这些方法都需要复杂的后续处理,并非直接增大光学系统的景深.

高质量的管道内窥镜既需要大的放大倍率,又需要大的景深.因此,放大倍率与景深的矛盾成为制约管道内窥镜性能的瓶颈.本文利用梯度折射率透镜介质折射率渐变的特点,将其与显微物镜相结合,设计了其像面弯曲近似球面、大景深的管道内窥镜,

其景深增大为原来系统的 200 倍.并获得了很好的像质,能与 CCD 等光敏器件结合,通过监视器可以方便观察被测管道内壁细小的裂痕、破损以及死角等.

## 1 梯度折射率透镜的特性

梯度折射率透镜具有大小端数值孔径可变、结构紧凑和像质好的优点,用它作为内窥镜的物镜可进一步简化结构和提高像质<sup>[11-12]</sup>.梯度折射率透镜介质的折射率是非均匀的、按某种规律变化的.因此,光线传播轨迹不是直线,而是曲线.

设计中采用径向梯度折射率透镜.其折射率是径向距离的函数,等折射率面为中心轴对称的圆柱面系,介质中折射率变化的梯度是常量.

梯度折射率材料折射率剖面的函数一般表达式为<sup>[13-14]</sup>

$$n^2(r) = n^2(0)[1 - (ar)^2 + h_4(ar)^4 + h_6(ar)^6 + \dots + h_i(ar)^i] \quad (1)$$

式中: $r$  为垂轴距离, $r = (x^2 + y^2)^{1/2}$ ;  $a$  为折射率梯度分布常量; $h_i$  为介质次项分布系数.

在径向梯度折射率介质  $n^2 = n^2(0)[1 - a^2(x^2 + y^2)]$  中,光线轨迹在子午面内是一条正弦曲线,其周期为  $(2\pi/a) \cos \zeta$ , 曲线的振幅、周期均与  $a$  成反比,且随光线初始入射  $\zeta_0$  (与光轴  $z$  的夹角) 变化,这表明该介质对不同入射角的光线具有不同的会聚能力.该介质的聚焦周期为  $2\pi/a$ , 表明这种介质中某一轴上点所发出的近轴光线会周期性的在轴上重新聚焦,此聚焦点为原轴上点的理想像点.实际光线与近轴光线轨迹如图 1.

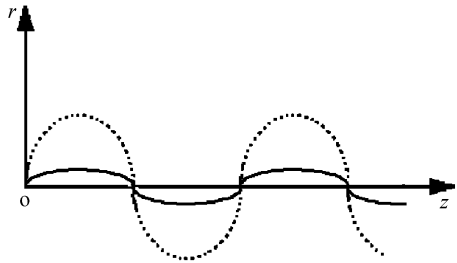


图1 光线轨迹  
Fig.1 Beam propagation path

梯度折射率透镜内的光传播正弦曲线特性使其获得很大的景深,且其景深随物距的减小而增大,不遵守几何光学中几何景深公式.因此,在对内窥镜的显微系统设计时,可使梯度折射率透镜的与显微镜结合,扩大内窥镜的景深,满足内窥镜光学系统大景深的设计要求.

## 2 内窥镜光学系统设计

本文根据管道内窥镜大放大倍率、大景深的实际使用需求,设计了将梯度折射率透镜与内窥镜中显微镜相结合的光学系统,在保证放大倍率的同时,有效提高内窥镜的光学系统景深.具体技术指标为:1)物方视场大于  $2y=6\text{ mm}$ ;2)景深大于  $1\text{ mm}$ ;3)用 CCD  $1/2''$ 接收,像素尺寸  $10\text{ }\mu\text{m}$ .

管道内窥镜如图2.检测被测管道时,被照明的检测表面先经径向梯度折射率透镜成像,经反射镜转向后,再用显微镜物镜将其放大,最后通过场镜和转像透镜成像并由 CCD 接收,最终通过监视器观察检测结果.

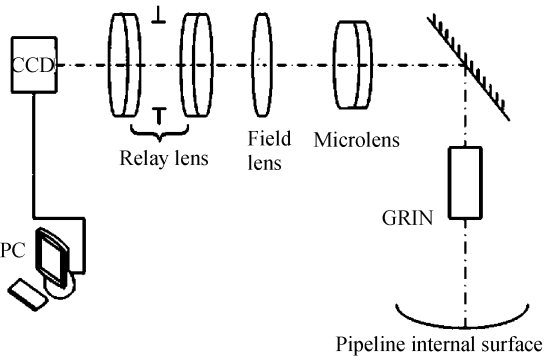


图2 管道内窥镜结构  
Fig.2 Layout of the pipeline endoscope

## 3 设计过程

### 3.1 4倍显微镜设计

管道内窥镜主要是针对工业管道的表面裂纹、毛刺及腐蚀及粘附杂物等异常现象进行诊断,不需

要太高的分辨率.因此,4倍显微镜即可满足使用要求.

设计的四倍显微镜技术指标为:焦距,  $f=36.2\text{ mm}$ ;线视场,  $2y=6.2\text{ mm}$ ;数值孔径,  $\text{NA}=0.1$ .

应用 ZEMAX 软件对其设计可得:其结构如图3;由其调制传递函数(图4)可知,该显微镜的调制传递函数曲线基本与衍射极限曲线重合;三个视场的点列图(图5)均方根半径分别为  $3.721\text{ }\mu\text{m}$ 、 $3.410\text{ }\mu\text{m}$ 、 $3.291\text{ }\mu\text{m}$ ,均小于艾里斑的半径  $7.068\text{ }\mu\text{m}$ ;最大波像差(图6)都小于  $0.25\lambda$ ;另外,显微镜的几何景深为  $0.018\text{ mm}$ .

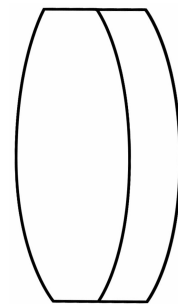


图3 显微镜二维结构  
Fig.3 Two-dimension structure of microlens

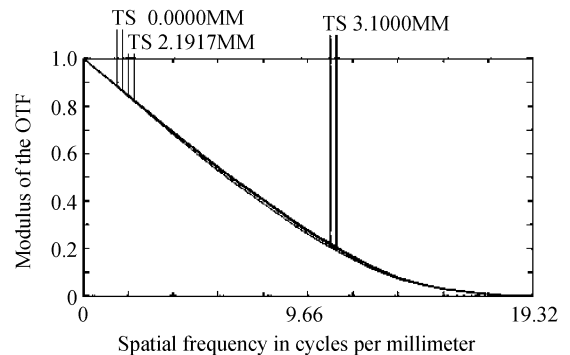


图4 显微镜调制传递函数  
Fig.4 MTF of microlens

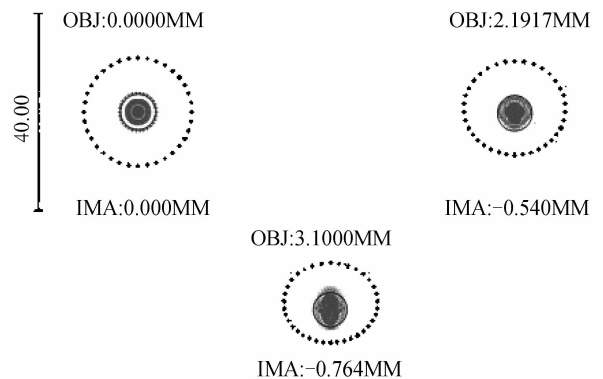


图5 显微镜点列  
Fig.5 Spot diagram of microlens

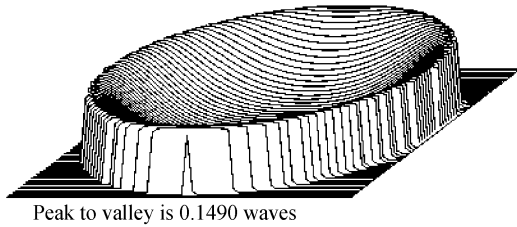


图 6 显微物镜波像差  
Fig. 6 Wavefront aberration of microlens

### 3.2 梯度折射率透镜设计

梯度折射率透镜介质的折射率是按某种规律变化的. 正是由于该特性, 将其与显微物镜相结合可以有效增加光学系统的成像景深. 在用 ZEMAX 设计时, 选用梯度折射率表面 Gradient 9, 其表达式为

$$z = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2r^2}} + x \tan \alpha + y \tan \beta \quad (2)$$

式中:  $c$  是表面曲率(半径的倒数),  $r$  是半径坐标,  $k$  是锥形常量,  $\tan \alpha$  和  $\tan \beta$  是  $X$  和  $Y$  轴上倾斜角的正切. 梯度折射率表面 Gradient 9 梯度折射率函数为

$$n = n_0 [1.0 - (A/2)r^2] \quad (3)$$

式中,  $A$ 、 $n_0$  分别与  $\lambda$  的函数关系为

$$A(\lambda) = [K_0 + K_1/\lambda^2 + K_2/\lambda^4]^2 \quad (4)$$

$$n_0 = B + C/\lambda^2 \quad (5)$$

式中,  $B$ 、 $C$ 、 $k_0$ 、 $k_1$  及  $k_2$  均为常量.

所设计的梯度折射率透镜如图 7, 其长度为 3 mm, 周期长度为 5.893 mm, NA 为 0.033, 使其像方数值孔径与显微物镜的物方数值孔径相匹配. 采用波长为 585 nm、光源的光谱效率值为 11 m/W 的 GaAs<sub>0.15</sub>P<sub>0.85</sub>N 单色光. 由调制传递函数(图 8)可知, 在截止频率为 50 lp/mm 时, 其调制传递函数曲线基本与衍射极限曲线重合. 0 视场的点列图(图 9)均方根半径小于艾里斑的半径 77.72  $\mu\text{m}$ .



图 7 梯度折射率透镜三维结构图  
Fig. 7 Three-dimension layout of GRIN

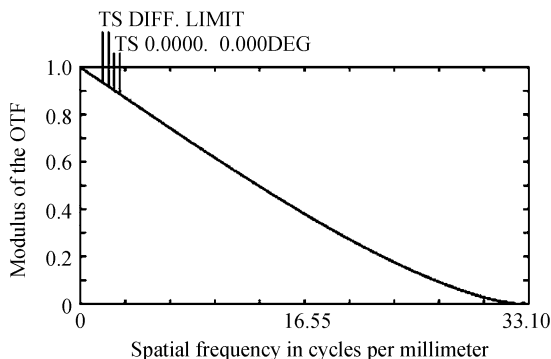


图 8 梯度折射率透镜调制传递函数  
Fig. 8 MTF of GRIN

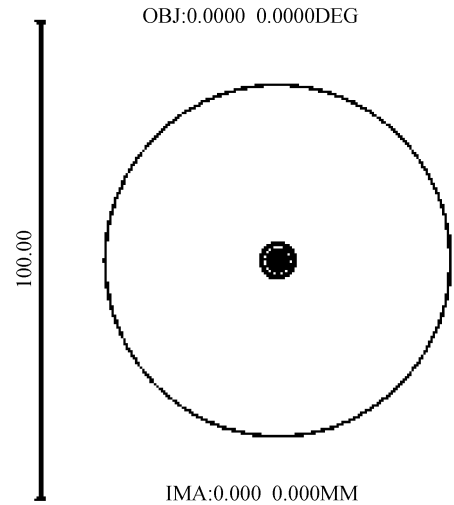


图 9 梯度折射率透镜点列图  
Fig. 9 Spot diagram of GRIN

满足设计需求.

### 3.3 转向透镜与场镜设计

为满足系统结构长度要求, 需设计一个放大倍率为转向透镜, 设计结构如图 10.

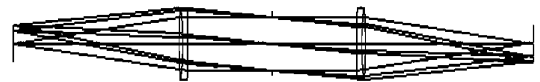


图 10 转像透镜结构图  
Fig. 10 Layout of the relay lens

为了解决经显微物镜后的成像光束口径过大, 无法与转向透镜匹配的问题, 需在显微物镜后的实像面处加入一个场镜. 由于该场镜是加在实像面处, 因此, 它对显微系统的光学特性无影响, 也不改变轴上点的光束走向.

### 3.4 总体优化

最后, 将设计完成的梯度折射率透镜、四倍显微物镜、转像透镜、场镜及反射镜进行总体优化设计, 使内窥镜中各个部分的参量相匹配, 以满足其使用要求.

在 ZEMAX 中输入各参量, 选择适当的优化函数, 进行优化设计. 最后, 将完成优化的数据进行规划, 得到最终的设计结果.

图 11 是内窥镜系统分别在 0、0.5、0.7 和 1 视场的点列图和调制传递函数曲线图. 由图可知, 各个视场的弥散斑大小均小于艾里斑半径 77.18  $\mu\text{m}$ . 且在截至频率为 50 lp/mm 时, 各视场的调制传递函数曲线均与衍射极限重合或接近, 截止频率为 50 lp/mm, 满足使用要求. 最后, 分别取各个视场的最佳像点, 绘制其像距与垂轴距离的曲线图, 如图 12. 可知, 该系统所有视场的最佳像点形成一条近似球面的曲线, 可应用测试的最佳表面为球面. 因此, 该系统可以方便的应用于工业管道内球形表面的测试.

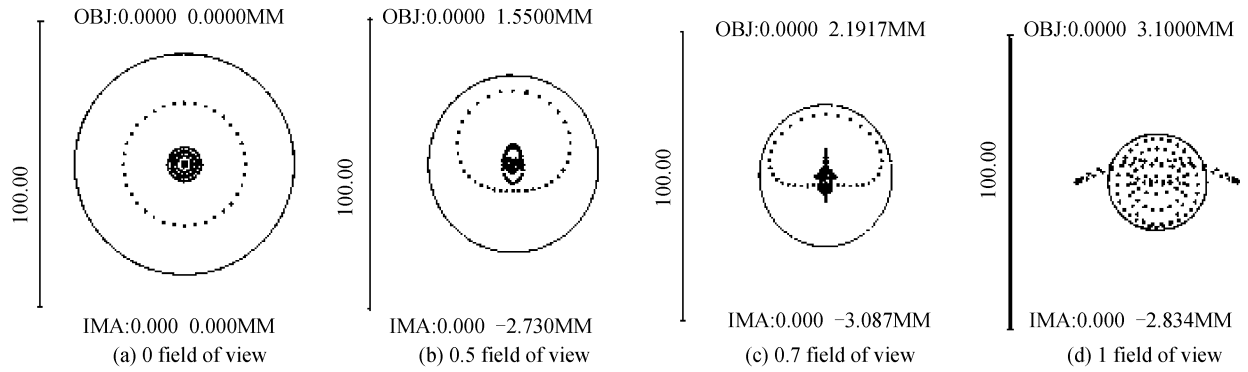


图 11 各个视场点列图

Fig. 11 Spot diagrams of each field of view

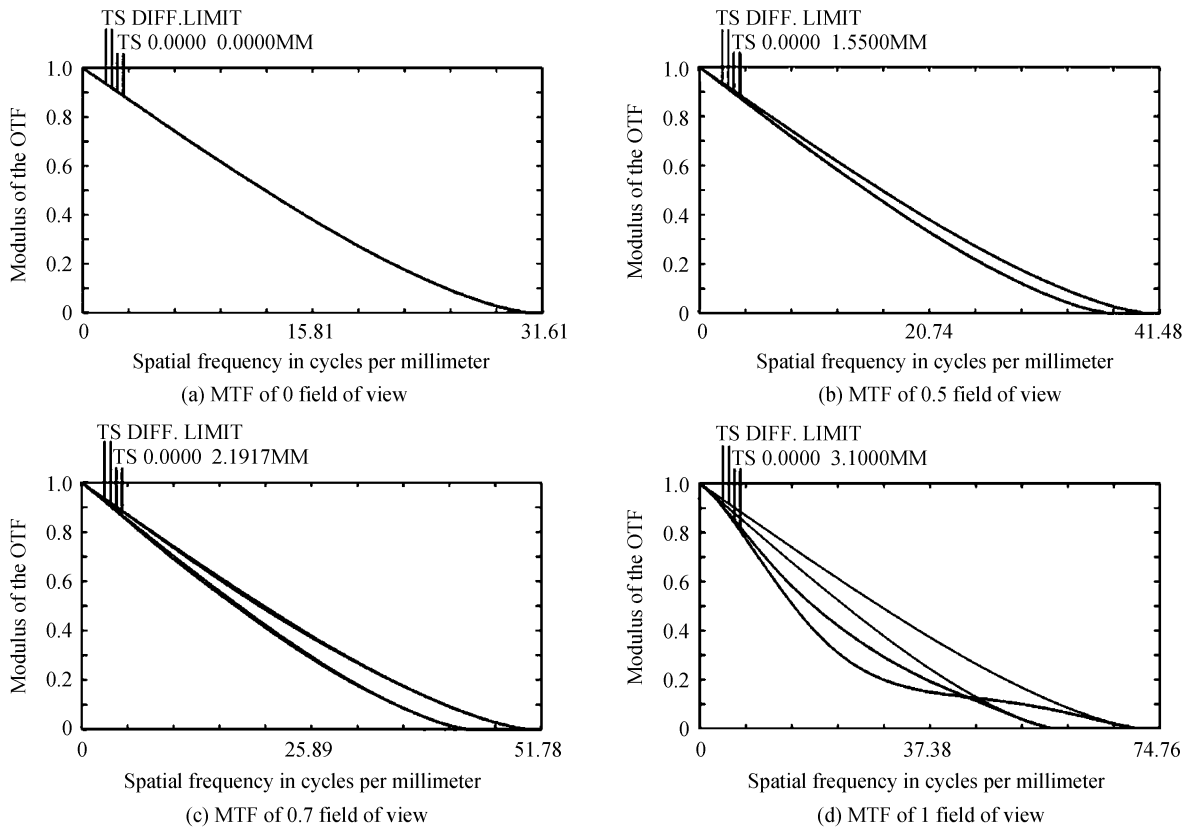


图 12 各视场调制传递函数

Fig. 12 Spot diagram of each field of view

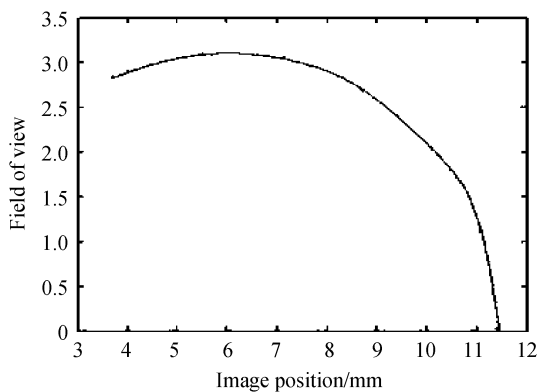


图 13 各视场的像点位置曲线

Fig. 13 Image point position of each field of view

### 3.5 数据分析

经分析和计算,显微物镜的几何景深为 0.018 mm

(几何景深可由公式  $250\epsilon/TNA$  求得). 在物镜前加入梯度折射率透镜后,由 ZEMAX 计算可得,当梯度折射率透镜物距(注:设计时倒追光线)由 0.2 mm 变为 0.218 mm 时,像距由 13.51 mm 变为 11.76 mm,显微物镜的实际几何景深增大了 1.75 mm,即近 100 倍.其物理景深由原来的 0.55 mm 增大至 5.5 mm(物理景深由公式  $\lambda/n' \sin u'^2$  可得出),也增大了 100 倍.可见,总景深显著提高,增大为原来的 200 倍.

由拉赫不变量  $J = n'u'y'$  可知,当  $u'$  减小时,  $y'$  增大,表明系统所成的像增大,但其分辨率降低.由 ZEMAX 计算表明,若显微物镜的数值孔径变为 0.01,即分辨率约为原来的 1/10,其实际分辨率为

$$\sigma = \lambda / 2NA = 0.00055 / (2 \times 0.01) = 0.027 \text{ mm} \quad (6)$$

由式(6)计算结果可知,尽管该系统的分辨率被降低,但仍然能满足管道内窥镜的测试要求.设计后的实际放大倍率  $y'/y = 3.1/2.8 = 1.1$ ,线视场由 0.78 增加至 2.83,即增大了 3.6 倍.

## 4 结论

将梯度折射率透镜用于管道内窥镜光学系统的设计,利用其介质折射率渐变的特点,与显微镜物镜相结合,在保证所需放大倍率的同时,使系统的几何景深和物理景深均增大为原来的 100 倍.由其结构图、点列图和 MTF 图可知,该系统拥有像质好、结构简单.与同类内窥镜相比,该系统不仅有更大的景深,而且像面近似球面,更适合圆柱形管道内壁的观察.微调梯度透镜的位置,可进一步增加景深,例如,如果梯度折射率透镜物距调节到 0.1 mm 时,该系统的几何景深可增大约 40 mm.计算表明,该系统可测直径为 10~45 mm 的管道.当它与 CCD 等器件相结合,不仅实现管道内窥镜的数字化,而且能通过监视器在更大景深范围内、方便的监测管道内壁的裂痕、磨损等清晰的图像.

### 参考文献

- [1] CHENG Wei-ming, LI Guo-dong. In-pipe video detector for small pipes[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2001, **9**(6): 519-522.  
程维明,李国栋.用于细小工业管道的视频探测器[J].*光学精密工程*,2001,**9**(6):519-522.
- [2] HENG Shi-quan. The application of industrial endoscope in power plant overhaul [J]. *Electronic Instrumentation Customer*, 2008, **5**(15): 117-118.  
横世权.工业内窥镜在某电厂大修中的应用[J].*仪器仪表用户*,2008,**5**(15):117-118.
- [3] MO Xu-tao, LIU Wen-yao, WANG Jin-jiang. Key techniques for extending the depth of field of optical imaging system[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2007, **12**(34): 129-133.  
莫绪涛,刘文耀,王晋疆.大景深光学成像系统关键技术的研究[J].*光电工程*,2007,**12**(34):129-133.
- [4] WANG Qing-ying. Deduction on the formula of depth of field [J]. *Journal of Nanyang Teachers'College (Natural Sciences Edition)*, 2003, **3**(2): 24-26.  
王清英.景深公式的推导[J].*南阳师范学院学报(自然科学版)*,2003,**3**(2):24-26.
- [5] HU Jin-min, XIE Shuang-wei. The depth of field of optical system[J]. *Physics Journal*, 2006(3): 59-60.  
胡金敏,谢双维.光学系统的景深[J].*物理通报*,2006(3):59-60.
- [6] 郁道银,谈恒英.工程光学[M].北京:机械工业出版社,2006: 58-63.
- [7] XIA Chun-lei, ZHENG Gang, DAI Shu-guang. Large depth of field imaging technology & its phase shift control[J]. *Laser Technology*, 2008, **32**(2): 159-162.  
夏春蕾,郑刚,戴曙光.大景深成像技术及其相移现象的控制[J].*激光技术*,2008,**32**(2):159-162.
- [8] WELFORD W T. Use of annular apertures to increase focal depth[J]. *JOSA A*, 1960, **50**(8):749-753.
- [9] FERRARO P, GRILLI S, ALFIERI D. Extended focused image in microscopy by digital holography[J]. *Opt Express*, 2005, **13**(18): 6738-6749.
- [10] GEORGE N, CHI W. Extended depth of field using a logarithmic asphere[J]. *J of Opt A: Pure and Appl Opt*, 2003, **5**(5): S157-S163.
- [11] TENTORI D, CAMACHO J, MARQUEZ H. Birefringence characterization of quarter-pitch gradient index lenses[J]. *Soc of Photo-Opt Instrument Eng*, 2002, **41**(10): 2468-2475.
- [12] SHAO Rui, CHEN Li. The development of GRIN optics[J]. *Chaohu College Journal*, 2006, **2**(8): 59-61.  
邵瑞,陈力.梯度折射率光学的发展现状[J].*巢湖学院学报*, 2006,**2**(8):59-61.
- [13] LI Yu-lin, HUO Jun-min, HE Zheng-quan. The development and application of gradient index Lens[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2000, **12**(29): 302-206.  
李育林,霍军民,贺正权.梯度折射率透镜的开发及应用[J].*光子学报*,2000,**12**(29):302-206.
- [14] 刘德森.纤维光学[M].北京:科学出版社,1987.

## Design of Pipeline Endoscope Based on Gradient Index Lens

GUO Jun, MA Yong-li, ZHANG Lu, ZHAO Cui-ling, WANG Wen-sheng

(Laboratory of Contemporary Optical Measure Technology, Changchun University of Science and Technology,  
Changchun 130022, China)

**Abstract:** According to the test requirements of the inner wall of a pipeline, an optical system of pipeline endoscope is designed, which is based on particular optical feature of gradient index lens and microscope. The system has the advantage of large depth of field. In the condition of required magnification, the depth of field of the system is increased by 200 than the initial system, which is achieved by the radial gradient in the refractive index of gradient index lens. The system is more suitable for pipeline internal surface inspection based on the feature of the nearly spherical surface of image plane. Combined with CCD, the digitalization test of pipeline endoscope is realized. Clear image of the defects in the inner wall of a pipeline, such as the crack and abrasions, can be checked conveniently by monitor in a larger extent of depth of field.

**Key words:** Endoscope; Gradient index lens (GRIN); Microscope; Large depth of field



**GUO Jun** was born in 1984. Now he is a M. S. degree candidate and his research interests focus on digital holographic interferometry and optical system design.



**WANG Wen-sheng** was born in 1944. As a professor and Doctoral Supervisor, he is engaged in the research on contemporary optical measure technology and optical design.