

轴向梯度折射率 TFCCD 监视镜头设计

赵存华,洪新华,刘照军,王金艳

(洛阳师范学院物理与电子信息学院,河南 洛阳 471022)

摘要:设计了焦距 26mm, $F2.8$ 的适用于 1024×1024 pixels, 像元 $15\mu\text{m} \times 15\mu\text{m}$ 面型硅 TFC-CD 的工厂车间监视镜头。分别设计了传统的全球面镜头和包含两片轴向梯度折射率材料镜头, 轴向梯度折射率监视镜头比原普通全球面镜头减少了两片透镜。经过像质评价, 后者像质有所提高。RMS 从 $12.67\mu\text{m}$ 减小到 $8.86\mu\text{m}$; 最大视场 35lp/mm 处最小 MTF 从 0.18 提高到 0.43; 畸变从 -5.21% 减小到 0.76% 。

关键词:轴向梯度折射率; 光学设计; RMS; MTF

中图分类号: TB851 **文献标识码:** B

Design of Axial Gradient Index TFCCD Monitor Lenses

ZHAO Cun-hua, HONG Xin-hua, LIU Zhao-jun, WANG Jin-yan

(College of Physics and Electronic Information, Luoyang Normal University, Luoyang 471022, China)

Abstract: Two monitor TFCCD lenses are designed with foci 50mm and $F2.8$ used for factory with 1024×1024 pixels and image element $15\mu\text{m} \times 15\mu\text{m}$. One is traditionally overall spherical lens, the other is a lens including two axial gradient index medium. The lenses are compared and found that the latter gets rid of two singlets but image quality improving a lot. RMS decrease from $12.67\mu\text{m}$ to $8.86\mu\text{m}$, minimum MTF at 35lp/mm increase from 0.18 to 0.43 and distortion at maximum field decrease from -5.21% to 0.76% .

Key words: axial gradient index; optics design; RMS; MTF

1 引言

现在安全监控仪器使用非常广泛, 比如政府大楼、银行柜台和自动取款间、学校大门和重点研究机构、道路交通违章和流量监测、工厂车间安全流程和操作监测等。在监控系统中, 监视镜头^[1-2]是一个重要的元件, 它决定了监控区域的范围、摄像的清晰度和分辨率等。根据监控区域的范围不同, 监视镜头的焦距有很大的差别。对于近距离的监视镜头, 通常焦距短、视场大。比如自动取款间中监视镜头, 焦距约 $3 \sim 8\text{mm}$, 视场一般大于 90° 。而一些长距离监视镜头, 焦距大 ($15 \sim 2500\text{mm}$ 不等), 视场角以监控区域决定, 约 $20^\circ \sim 60^\circ$ 。

轴向梯度折射率材料近些年来受到很大的重

视^[3-16]。单片轴向梯度透镜相当于两片非球面透镜, 因此在校正像差方面优于非球面。并且, 轴向梯度透镜使用球面, 在制造加工、检验检测方面与非球面相比都有很大的优势。国外对轴向梯度折射率透镜的像差理论及其在光学设计中的应用做了大量的研究^[3-12]。国内中科院西安光机所^[13-14]在进行轴向梯度折射率材料的制造研究, 作者在文献^[15]中设计了一个单片轴向梯度折射率激光束聚焦镜。

本文设计了应用于工业生产监控的监视镜头,

基金项目:河南省教育厅项目(No. 072300410330)资助。

作者简介:赵存华(1975-), 男, 讲师, 硕士, 主要研究方向光学设计与激光技术。E-mail: zhao.cun.hua@163.com

收稿日期:2008-06-09

焦距 26mm, F2.8。使用美国产 1in (1in = 2.54cm) 面型硅 TFCCD, 1024 × 1024 像素, 像元 15μm × 15μm。分别设计了一个全球面普通监视镜头和一个包含两片轴向梯度折射率材料的监视镜头。对这两个镜头作了比较, 发现后者在减少两片透镜的情况下, 像质仍然有所提高。

2 设计考虑

根据监视区域的大小和离监视区域的距离, 我们计算监视镜头的焦距, 使用下面公式:

$$f' = HL/\delta \tag{1}$$

其中, H 是 TFCCD 的对角线长度之半, 约 10.86mm; L 为监视区域离镜头的距离; δ 是监视区域半径。我们要求, 在 3m 处监视约 2.5m 的区域, 所以 $f' \approx 26\text{mm}$ 。因此, 视场角为 $2\omega = 2\arctan(H/f') = 45.3^\circ$ 。实际上, 我们在优化过程中, 直接使用近轴像面作为视场。因为要求监视区域的细节要求, 我们选用大的 1in 美国产 TFCCD, 1024 × 1024 像素, 像元 15μm × 15μm。

3 轴向梯度折射率材料

普通球面在光学设计中使用最多, 但为了提高像质或减小体积、质量等考虑, 需要引入非球面等光学元件。而非球面的引入, 不但会增加加工工艺和检验检测方面的难度, 而且会大幅度增加成本, 一般单片非球面的成本相当于单片球面透镜的 10 倍。再一点, 非球面对像差的校正也不是万能的, 也有一定的限度。为此, 很多先进的技术被提出来以取代非球面技术, 比如自由曲面技术^[17]、二元光学技术^[18]和梯度折射率技术等。自由曲面的设计和加工都比较麻烦, 尚处于研究阶段。二元光学技术对像差校正较好(尤其是色差), 但加工成本比非球面还要高, 作为低成本的普通产品来说, 普及之路还很长。梯度折射率是一个历史较长的技术, 理论研究较多, 实用化受制造技术的限制。由于近期, 轴向梯度折射率材料的制造有所突破, 已经可以制造出大直径、深厚度、大折射率差的材料^[16], 所以轴向梯度折射率越来越受到重视。

轴向梯度折射率材料等折射率面垂直于光轴, 折射率沿光轴变化。设光轴为 z 轴, 则其折射率为:

$$n(z) = n_{00} + n_{01}z + n_{02}z^2 + \dots \tag{2}$$

在材料的交界面上, 光线发生折射, 满足 Snell 定律 $n\sin\theta = n'\sin\theta'$, 其中公式左边为物方的折射率

和入射角, 右边为像方的折射率和入射角。如图 1 (a) 图所示, 是单片非球面透镜, 它对应的参考球面也画在了图上。对离轴相同距离处, 非球面正是改变入射的角度以影响光线行进。而轴向梯度折射率, 虽然使用普通球面, 但离轴相同距离处折射率发生了变化, 从而也影响光线的进行。因此, 非球面与轴向梯度折射率面不同处在于, 改变 Snell 定律中两项的不同项, 但效果是一样的。而单片轴向梯度折射率透镜有两个面, 因此相当于两个非球面。所以它对像差的校正应该比非球面要好。

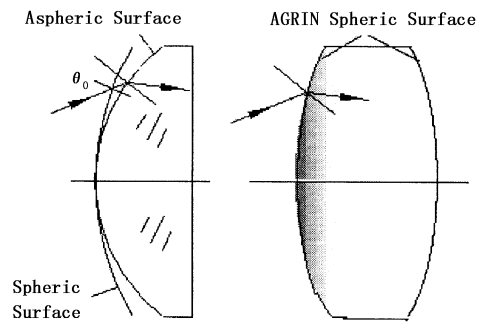


图1 非球面和轴向梯度折射率面

轴向梯度折射率材料的制造, 采用熔融扩散法, 如图 2 所示。掺杂相同离子不同含量的许多玻璃平板放大一起, 在高温状态下发生熔融/扩散过程, 经过适当的时间之后, 就产生了大块的梯度折射率玻璃。使原来阶跃状态的折射率变化, 成为接近直线性的折射率变化。此种过程, 经研究是高度可重复性的, 成本远低于非球面的加工。

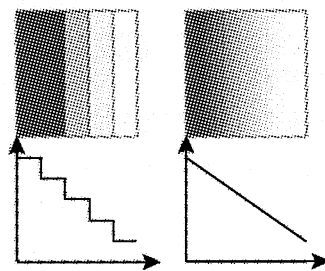


图2 熔融扩散过程

4 监视镜头设计

设计的监视镜头结果如图 3 所示。左图为 7 片全球面监视镜头, 右图为包含两片轴向梯度折射率镜片的 5 片式监视镜头。图 4 是全球面监视镜头的 MTF, 图 5 是含轴向梯度折射率材料的监视镜头 MTF。最大空间频率 50lp/mm, 三个视场分别为近轴像高 0mm, 7.7mm 和 10.9mm。从 MTF 图上可以

看出,后者像质明显好于前者。在 $50\text{lp}/\text{mm}$ 处,最小 MTF(指所有视场的子午或弧矢)前者仅为 0.18,而后者达到 0.43。图 6 是全球面监视镜头的场曲和畸变曲线,图 7 是含轴向梯度折射率材料的监视镜头的场曲和畸变曲线。场曲两者都差不多,但畸变后者明显好于前者,畸变前者为 -5.21% ,后者为 0.76% 。表 1 列出了两个镜头的一些参数比较。含轴向梯度折射率材料的监视镜头比普通全球面镜头长度和质量均小。点列图上,7 片全球面监视镜头比 5 片含轴向梯度折射率材料监视镜头轴上 RMS 略小,但轴外后者明显小于前者,且两者均小于 CCD 面元 $15\mu\text{m}$ 。几何 RMS 也是如此。能量环包围能量,在 $15\mu\text{m}$ 处,全球面监视镜头为 92.8% ,含轴向梯度折射率材料监视镜头为 95.7% ,也好于前者。

其中轴向梯度折射率材料在第二个监视镜头中,分别位于第 2 片和第 5 片。它们的折射率分布分别为:

$$n_2(z_1) = 1.55735 - 0.018529z_1$$

$$n_5(z_2) = 1.50165 + 0.0017282z_2$$

均是线性轴向梯度折射率变化。对于第 2 片 AGRIN,厚度为 3.52mm ,折射率从 $1.55735 \sim 1.49213$ 变化。第 5 片 AGRIN,厚度 3.54mm ,折射率从 $1.50165 \sim 1.56283$ 变化。均可通过冕牌玻璃,使用熔融扩散法制造出来。

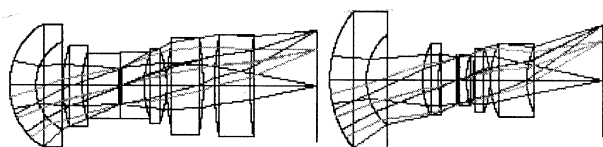


图 3 两个监视镜头

左:7 片全球面;右:5 片含两片 AGRIN

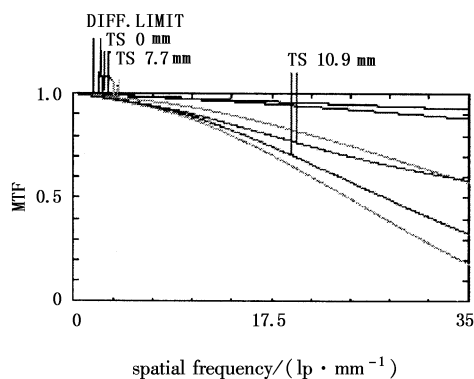


图 4 全球面监视镜头的 MTF

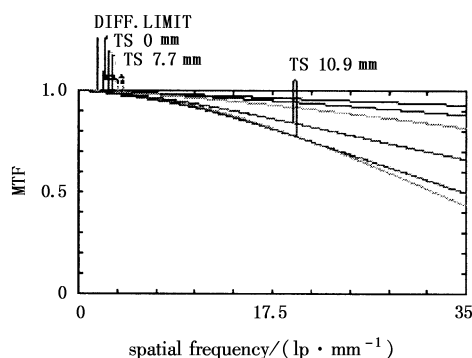


图 5 轴向梯度折射率监视镜头的 MTF

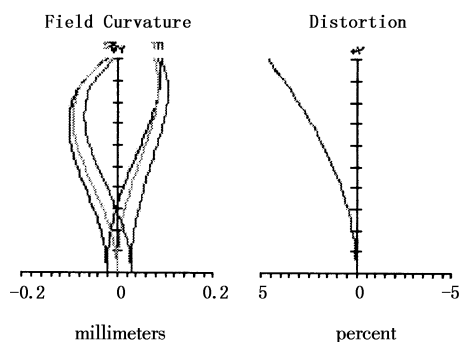


图 6 全球面监视镜头的场曲和畸变

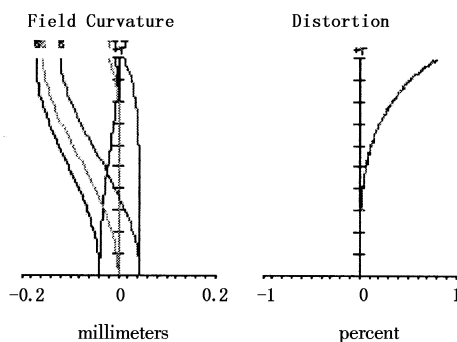


图 7 轴向梯度折射率监视镜头的场曲和畸变

表 1 两个监视镜头的对比

参数	全球面 监视镜头	AGRIN 监视镜头
片数/片	7	5
总长度(第 1 面到像面)/mm	68.11	59.68
总质量/g	42	27
MTF($50\text{lp} \cdot \text{mm}^{-1}$)	0.18	0.43
Maximum Distortion/%	-5.21	0.76
RMS RADIUS(10.9mm)/ μm	12.67	8.86
GEO RADIUS(10.9mm)/ μm	34.17	20.98
Encircled Energy($15\mu\text{m}$)/%	92.8	95.7

5 结束语

设计了 7 片式全球面监视镜头,和 5 片式包含两片轴向梯度折射率材料的监视镜头。对比了它们的成像质量和一阶特性,发现后者成像质量和一阶特性明显好于前者。

参考文献:

- [1] 杨建峰,阮萍,常凌颖,等. 高温电视摄像镜头设计[J]. 光子学报,2005,34(7):1081-1085.
- [2] 胡玉禧,周绍祥,王克逸. 超大孔径摄像镜头设计[J]. 光学技术,2002,28(3):226-227.
- [3] P K Manhart, R Blankenbecler. Fundamentals of macro axial gradient optical design and engineering[J]. Optical Engineering,1997,36(4):1607-1621.
- [4] P K Manhart, X J Xu. Recent progress in macro axial gradient index optics (it's time to rethink gradients) [J]. SPIE,1995,2573:250-260.
- [5] P K Manhart, B V Hunter, R Blankenbecler. Dispersion sensitivity of large-scale axial gradient index glass for spherochromat doublets [J]. SPIE, 1999, 3779: 190-201.
- [6] P J Sands. Third-order aberrations of inhomogeneous lenses[J]. Opt. Soc. Am. ,1970,60:1436-1443.
- [7] P J Sands. Aberrations of lenses with axial index distributions[J]. Opt. Soc. Am. ,1971,61:777-783.
- [8] F Bociort. Primary aberration coefficients for axial gradient-index lenses[J]. SPIE,1999,3737:20-31.
- [9] J A Díaz, C Pizarro, J Arasa. Third-order aberrations of an AGRIN thin lens as a function of the shape and conjugate variables[J]. SPIE,2006,6342:1-10.
- [10] X J Xu, M A Wickson, M Savard, et al.,. Control of gradient index profile for gradient index glasses of macro size and large n for a varifocal slide projector lens[J]. SPIE, 2000,1993:369-378.
- [11] R N Pfisterer. Design of a 35-mm photographic objective using axial GRIN materials [J]. SPIE, 2000, 1993: 359-368.
- [12] R N Pfisterer. Design of an objective for night-vision[J]. SPIE,1995,2537:270-278.
- [13] 霍军民,李育林. 大直径大折射率差轴向梯度折射率玻璃[J]. 光电子·激光,2003,14(8):806-808.
- [14] 霍军民,李育林. 大尺寸轴向梯度折射率光学玻璃板的研制[J]. 光子学报,2003,32(10):1278-1280.
- [15] 赵存华,王松德. 轴向梯度折射率材料用于激光束聚焦镜设计[J]. 激光与红外,2008,38(3):255-258.
- [16] J J Hagerty, D N Pulsifer[P]. U S. Patent,1990,4929065.
- [17] R Schoene, A Zimmermann, T Hanning. Level curve cutting of NURBS-approximated free formed surfaces [J]. SPIE,2005,5824:277-284.
- [18] 金国藩,严瑛白,邬敏贤. 二元光学[M]. 北京:国防工业出版社,1998.