

文章编号: 1005-5630(2014)05-0420-06

一款条码扫描成像镜头的多方案设计和选择

吴世蕙, 黄晓燕, 张燕珂

(宁波永新光学股份有限公司, 浙江 宁波 315040)

摘要: 设计了一种扫描成像镜头, 镜头焦距为 7.9 mm, 视场角为 52° , 采用 CMOS 线性传感器接收。为了使镜头成本更低, 同时保证好的成像性能, 引入了塑料非球面, 设计了一个含有高次塑料非球面镜片和一个玻璃球面镜片(1G1P)的结构。相对传统三片式玻璃球面镜片(3P)的结构来讲, 1G1P 结构的光学性能更好地满足了技术指标要求, 成本为 3G 结构的 50%, 推广应用前景好。

关键词: 条码成像镜头; 调制传递函数; 塑料非球面; 优化方案

中图分类号: TH 741 **文献标志码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1005-5630.2014.05.011

Design of a barcode imaging lens

WU Shihui, HUANG Xiaoyan, ZHANG Yanke

(Ningbo Yongxin Optics Co., Ltd., Ningbo 315040, China)

Abstract: A barcode imaging lens is designed with focus length 7.9 mm and field of view 52° . The image is received by a liner CMOS sensor. In order to obtain a low cost meanwhile a good imaging performance, plastic aspherical surface is used with high index factors to become a one glass one plastic lenses optical system (1G1P). Compared with traditional three glass lenses optical system (3G), 1G1P system design is of better imaging performance to meet the specification and only needs 50% producing cost of 3G. It has a potential market.

Key words: barcode imaging lens; MTF; plastic aspherical lens; optimization design

引 言

近年来随着条码信息量的不断增加,越来越多的图像扫描技术替代了先前的激光条码扫描技术。虽然普通的智能手机都拥有照相拍摄功能,但在特定应用场合下,只有专用条码扫描仪才能做到准确而高效的识别。了解扫描成像镜头的应用场合、市场、成本,对设计出高性能、低成本的结构方案非常重要。本文根据实际使用要求设计了一款条码扫描成像镜头,其结构中含有高次塑料非球面,在保证良好性能的前提下,有效降低了量产成本。

1 条码扫描成像镜头的设计要求

条码扫描成像镜头使用波长为 640 nm 的 LED 光源。当光线照射到目标条形码上时,扫描成像镜头便将条形码图像成像到 CMOS 线性传感器上,然后由解码器软件读取和处理条码像。该扫描

收稿日期: 2014-07-24

作者简介: 吴世蕙(1960-),女,工程师,主要从事成像光学系统的工艺和产业化技术研究。E-mail: wu-sh@novel-trading.com

成像镜头主要用于图书馆录像带条码检索仪器中,要求镜头外径为 5.2 mm,长度为 4.5 mm,技术指标见表 1。

表 1 条码扫描成像镜头的技术指标
Tab. 1 The specifications of barcode imaging lens

| 名称 | 焦距/mm | 物距/mm | 入瞳直径/mm | 法兰焦距/mm | 后工作距/mm |
|----|----------|-----------------|-----------------|---------|---------|
| 指标 | 7.9±0.25 | 203 | 1.2 | 9.0 | 4.6±0.5 |
| 名称 | 视场角 | 轴上 MTF@70 lp/mm | 轴外 MTF@70 lp/mm | 畸变 | |
| 指标 | 52° | >30% | >25% | <3% | |

从应用条件和技术指标来看,这款镜头的外形尺寸小、视场大、MTF 要求较高,同时还要满足低成本和每年 30 万个的量产要求,设计难度较高。

2 设计过程

利用 Zemax 软件,分别采用了三片式玻璃球面(3G)结构和含有高次塑料非球面(1G1P)结构进行仿真设计,得到两个对比结构。这两个光学结构均满足设计要求,主要从光学性能、加工工艺和成本等方面进行比较分析,确定最佳设计方案。

成功的设计通常从初始结构选型开始,多年的设计经验和丰富的像差理论知识,有助于准确快速地建立起初始结构^[1-2]。从初始结构出发,设置系统变量和优化函数,控制像差,反复优化直到所有视场的像差都满足设计目标。设计完成后,在对 3G 结构和 1G1P 结构的像质评价中,将用到调制传递函数(MTF)。与其它评价函数相比,MTF 能全面、定量地反映光学系统的像差性质和由衍射所引起的综合效应,能有效降低研发成本,减少人力、物力的浪费,缩短研制设计周期^[3]。

2.1 3G 光学系统设计

选择三片式玻璃镜片作为初始结构,利用 Zemax 软件的优化功能,调整优化操作数和变量,平衡各种像差,得到 3G 镜头的结构参数见表 2。

表 2 3G 镜头结构参数
Tab. 2 Structure parameters of the 3G lens

| 序号 | 类型 | Radius/mm | 厚度/mm | 折射率 | 色散系数 | 口径/mm |
|----|-----|-----------|-------|-----------|----------|-------|
| 1 | 标准面 | 2.300 | 0.600 | 1.846 670 | 23.791 2 | 2.810 |
| 2 | 标准面 | 1.483 | 0.170 | | | 2.122 |
| 3 | 标准面 | 1.555 | 1.330 | 1.744 003 | 44.926 6 | 2.048 |
| 4 | 标准面 | 2.170 | 0.153 | | | 0.968 |
| 光阑 | 标准面 | ∞ | 1.000 | | | 0.800 |
| 6 | 标准面 | 8.659 | 1.000 | 1.883 004 | 40.810 9 | 2.760 |
| 7 | 标准面 | ∞ | 4.491 | | | |

2.2 1G1P 光学系统设计

以上 3G 镜头的设计结果已经达到了设计技术指标的要求。为了能进一步提高系统性能,减少镜片数量,降低成本,得到一个更好的设计结果,在光学系统中引入了非球面塑料镜片。

光学系统中某些球面透镜的非球面化不仅可以减少镜片数量,还可以很好地提高镜头的成像质量和光学性能,甚至还能降低系统公差灵敏度^[5-6],从而实现镜头的低成本、小型化、轻量化,提高产品的市场竞争力^[7]。这是因为球面玻璃透镜从中心到边缘只有一个恒定的曲率,在设计过程中只有一个设计自由度可以变换;而非球面透镜从中心到边缘曲率连续发生变化,理论上有限个设计自由度。因此,非球面

透镜在像差矫正方面有着很大的优势。1G1P 光学系统设计中用到的高次非球面是旋转对称偶次非球面^[8],非球面方程为

$$x = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (K + 1)c^2r^2}} + \alpha_1r^2 + \alpha_2r^4 + \alpha_3r^6 + \alpha_4r^8 + \alpha_5r^{10} + \alpha_6r^{12} + \alpha_7r^{14} + \alpha_8r^{16}$$

式中, r 表示光线与曲面交点高度; c 表示非球面顶点曲率,在 Zemax 里用 Radius 值的倒数来表示; $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_8$ 为高次非球面系数; K 与二次曲面的离心率有关,在 Zemax 里用 Conic 值来表示。

将第二个镜片的两个面分别设置为偶次非球面,材料为 POLYCARB,利用 Zemax 软件的优化功能,增加非球面系数作为变量,调整优化操作数,平衡各种像差。在优化过程中控制塑料非球镜片的形状,满足注塑工艺要求。得到的 1G1P 镜头结构,具体参数见表 3,两个非球面的 Conic 值和高次非球面系数见表 4。

表 3 1G1P 镜头结构参数

Tab. 3 Structure parameters of the 1G1P lens

| 序号 | 类型 | Radius/mm | 厚度/mm | 折射率 | 色散系数 | 口径/mm |
|----|-----|-----------|-------|-----------|----------|-------|
| 1 | 标准面 | 1.800 | 1.200 | 1.516 797 | 64.212 4 | 3.200 |
| 2 | 标准面 | 2.445 | 0.214 | | | 2.000 |
| 光阑 | 标准面 | ∞ | 0.800 | | | 0.896 |
| 4 | 非球面 | -2.900 | 1.200 | 1.531 160 | 56.043 8 | 2.200 |
| 5 | 非球面 | -2.800 | 0.920 | | | 3.200 |

表 4 1G1P 镜头非球面系数

Tab. 4 Aspheric coefficients of the 1G1P lens

| 序号 | K | α_1 | α_2 | α_3 | α_4 | α_5 | α_6 | α_7 | α_8 |
|----|-------|------------|--------------|--------------|--------------|--------------|------------|------------|------------|
| 4 | 5.766 | 0 | -0.047 735 4 | 0.013 565 1 | -0.052 521 3 | -0.018 675 8 | 0 | 0 | 0 |
| 5 | 1.700 | 0 | -0.005 782 2 | -0.010 025 9 | 0.005 685 6 | -0.002 162 0 | 0 | 0 | 0 |

3 理论结果对比讨论

3.1 基本参数比较

图 1 和图 2 分别是 3G 镜头和 1G1P 镜头的光学结构图。从镜头焦距、镜头长度、法兰焦距和后工作距离这 4 个基本的参数比较来看,两者都满足了设计的基本要求,具体数值见表 5。

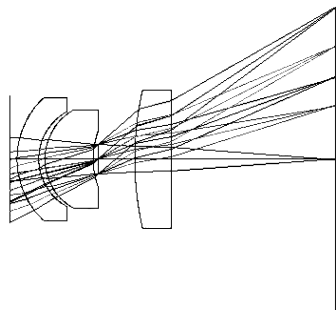


图 1 3G 镜头的光学结构
Fig. 1 Layout of the 3G lens
after optimization

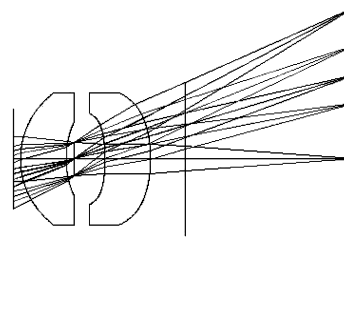


图 2 1G1P 镜头的光学结构
Fig. 2 Layout of the 1G1P lens
after optimization

表 5 3G 镜头和 1G1P 镜头指标对比
Tab. 5 Values comparison of 3G and 1G1P Lens

| 名称 | 焦距/mm | 镜头长度/mm | 法兰焦距/mm | 后工作距/mm |
|---------|----------|---------|---------|---------|
| 指标 | 7.9±0.25 | 4.50 | 9.00 | 4.6±0.5 |
| 3G 镜头 | 7.91 | 4.43 | 9.12 | 4.69 |
| 1G1P 镜头 | 7.90 | 4.55 | 9.00 | 4.45 |

3.2 场曲与畸变以及 MTF 比较

图 3、图 4 分别是两款镜头的场曲和畸变图。镜头的场曲数值越小说明成像后的图像平坦度越好,1G1P 镜头的场曲只有 0.06;镜头的畸变数值越小说明成像后的图像变形越少,越真实,1G1P 镜头的畸变只有 1.1%。

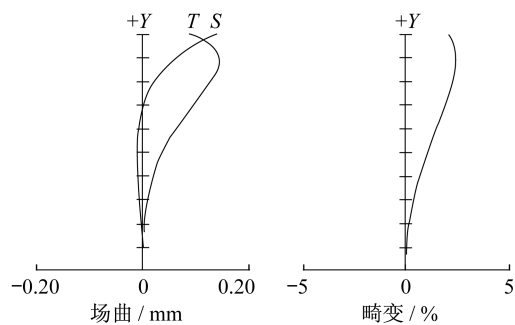


图 3 3G 镜头场曲和畸变

Fig. 3 Field curvature/distortion of the 3G lens

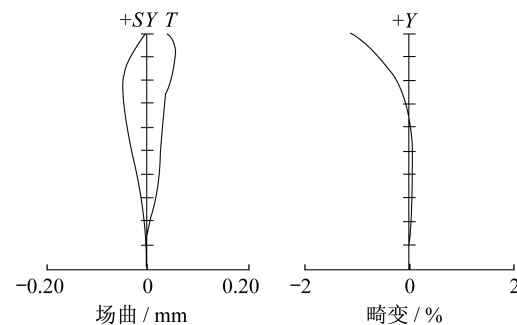


图 4 1G1P 镜头场曲和畸变

Fig. 4 Field curvature/distortion of the 1G1P lens

图 5、图 6 分别是两款镜头的 MTF 曲线图。镜头的 MTF 越接近衍射极限,说明成像系统的解像能力越强,分辨率越高。与 3G 镜头相比,1G1P 镜头在轴上以及轴外的 MTF 都有了很大的提高,超出了技术指标的要求。

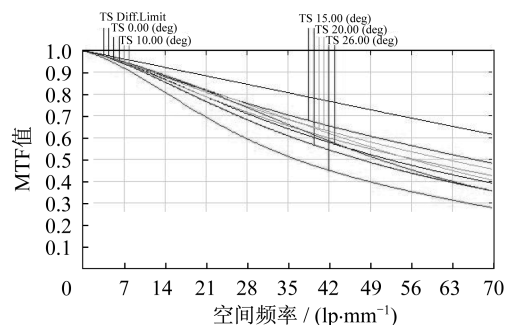


图 5 3G 镜头 MTF 曲线

Fig. 5 MTF of the 3G lens

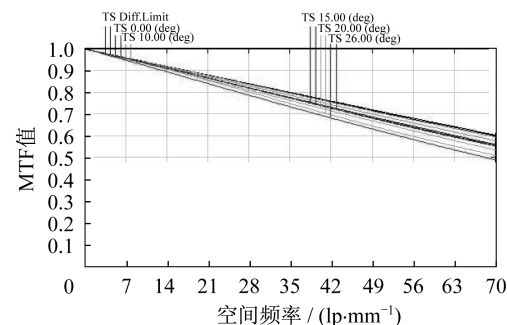


图 6 1G1P 镜头 MTF 曲线

Fig. 6 MTF of the 1G1P lens

综合两个镜头的场曲、畸变以及 MTF 曲线对比结果,1G1P 镜头光学性能优于 3G 镜头,详细数值见表 6。

3.3 点列图比较

图 7 和图 8 分别是 3G 镜头与 1G1P 镜头的点列图。图 7 所示 3G 镜头的点列图中最大均平方根 (RMS) 半径为 8.6 μm ,图 8 所示 1G1P 镜头的点列图中最大 RMS 半径为 2 μm 。对比可知 1G1P 镜头优于 3G 镜头。

表 6 3G 镜头和 1G1P 镜头的对比
Tab. 6 Values comparison of 3G and 1G1P Lens

| 名称 | 畸变 | 场曲/mm | 轴上 MTF@70 lp/mm | 轴外 MTF@70 lp/mm |
|---------|------|-------|-----------------|-----------------|
| 技术指标 | <3% | — | >30% | >25% |
| 3G 镜头 | 2.4% | 0.15 | 39% | 28% |
| 1G1P 镜头 | 1.1% | 0.06 | 60% | 49% |

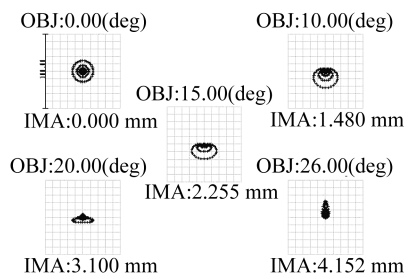


图 7 3G 镜头点列图

Fig. 7 Spot diagram of the 3G lens

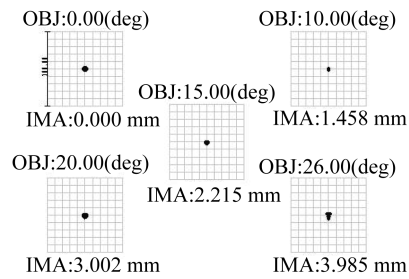


图 8 1G1P 镜头点列图

Fig. 8 Spot diagram of the 1G1P lens

3.4 相对照度比较

图 9 和图 10 分别是 3G 镜头与 1G1P 镜头相对照度图。对于扫描成像镜头,相对照度越大越好。如果照度太低,视场边缘的光线会较暗^[1],不利于 CMOS 线性传感器的信号接收,影响图像识别。图 9 中 3G 镜头边缘视场的相对照度为 65%,图 10 中 1G1P 镜头边缘视场的相对照度为 72%。同样是 1G1P 镜头优于 3G 镜头。

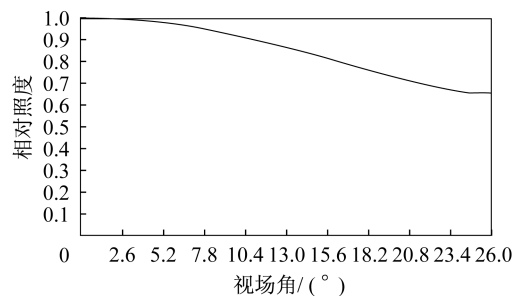


图 9 3G 镜头相对照度

Fig. 9 Relative illumination of the 3G lens

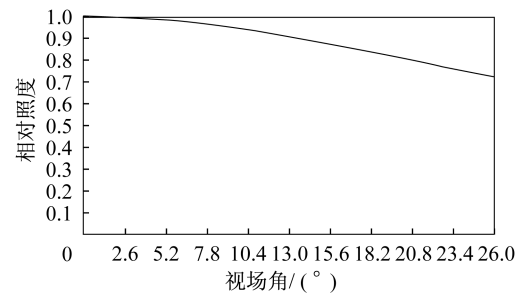


图 10 1G1P 镜头相对照度

Fig. 10 Relative illumination of the 1G1P lens

3.5 成本比较

利用 Zemax 软件对两款镜头进行公差分析,结果显示:所有玻璃球面镜片表面的光圈数为 3,局部光圈数为 0.5,厚度公差为 ±0.03 mm,偏心为 0.1°;塑料非球面表面的光圈为 0.5,局部光圈为 0.05,厚度公差为 ±0.02 mm,偏心为 0.05°。这些公差都在常规可加工的公差范围内。根据结构参数和公差分析,对两款镜头进行了成本分析,经核算 1G1P 镜头成本为 3G 镜头的 50%。

4 1P1G 镜头成品检测及应用

1G1P 镜头成品的 MTF 测试曲线如图 11 所示(使用 TRIOPTICS 公司 ImageMaster HR 型传递函数仪测得)。

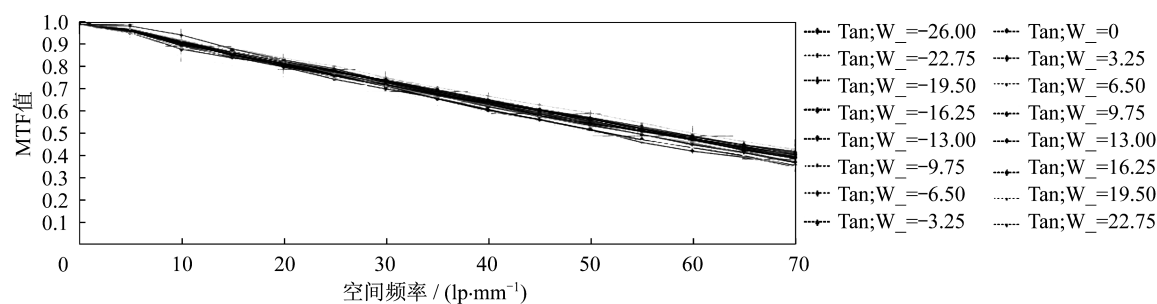


图 11 1G1P 镜头实测 MTF

Fig. 11 The measured MTF of the 1G1P lens

根据图 11 中的测试结果,对轴上和轴外(半视场角 26°) 70 lp/mm 处,客户要求 MTF 值、理论设计值和成品测试值进行了比较,如表 7 所示。

表 7 1G1P 镜头三项指标对比

Tab. 7 Comparison of 1G1P Lens with three indicators

| | 轴上 MTF@ 70 lp/mm | 轴外(半视场角 26°) MTF@ 70 lp/mm |
|-------|----------------------------|--|
| 客户要求值 | 30% | 25% |
| 理论设计值 | 60% | 49% |
| 成品测试值 | 42.7% | 36.5% |

1P1G 镜头实测 MTF 值达到并超过了客户的要求。并且只要对光阑直径稍作修改,就能满足 $50\sim 250 \text{ mm}$ 的工作距离,可以推广应用到超市零售、医院病历等场合的手持式条码扫描仪中。

5 结 论

针对专业条码扫描仪的要求,设计了焦距为 7.9 mm ,视场角为 52° 的扫描成像镜头,由 CMOS 线性传感器作为接收器,利用 Zemax 设计软件进行设计与优化。在满足设计指标的前提下,从镜片量产化加工工艺、装配工艺、合格率、成本等多方面进行设计优化,采用两个设计方案对比,选取像质优良、加工难度适中的 1G1P 方案实施试制和量产。最终经试制量产验证,该款镜头加工工艺性好、成品率高且成本低廉,是一款具有竞争力并可推广的条码扫描成像镜头。

参考文献:

- [1] 洪 坚. $3.2\sim 8 \text{ mm}$ 百万像素变焦安防镜头设计[J]. 光学仪器, 2014, 36(2): 131-135.
- [2] 王之江. 光学设计理论基础[M]. 2 版. 北京: 科学出版社, 1985: 304-314.
- [3] 张双翼, 徐熙平. 激光扫描系统中 F-0 透镜的光学设计[J]. 光学仪器, 2012, 34(5): 40-44.
- [4] 李士贤, 李 林. 光学设计手册[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1996: 162-164.
- [5] BETENSKY E. Aberration correction and desensitization of an inverse triplet objective lens[J]. SPIE, 1998, 3482: 264-268.
- [6] JEFFS M. Reduced manufacturing sensitivity in multi-element lens systems[J]. SPIE, 2002, 4832: 104-113.
- [7] 潘君骅. 光学非球面的设计、加工与检验[M]. 苏州: 苏州大学出版社, 2004: 42-47.
- [8] 李晓彤, 岑兆丰. 几何光学·像差·光学设计[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2003: 286-291.