

引用格式: CHEN Fanghan, ZHAO Guangyu, ZHANG Xiaomei, et al. Multi-axis Focusing Lens Design for Precise Assembly of High-resolution Mobile Phone Lens[J]. Acta Photonica Sinica, 2021, 50(12):1222001

陈方涵,赵光宇,张晓梅,等. 高分辨率手机镜头精密组装多光轴聚焦镜头设计[J]. 光子学报, 2021, 50(12):1222001

# 高分辨率手机镜头精密组装多光轴聚焦镜头设计

陈方涵<sup>1</sup>, 赵光宇<sup>1</sup>, 张晓梅<sup>1</sup>, 蒋仕龙<sup>1</sup>, 温志刚<sup>2</sup>

(1 深港产学研基地(北京大学香港科技大学深圳研修院)运动控制技术实验室, 广东 深圳 518057)

(2 深圳市大族电机科技有限公司, 广东 深圳 518058)

**摘要:**为解决玻塑混合高分辨率手机镜头制造中,玻璃镜片与塑料镜组在组装时存在的位置敏感、效率和良品率低等问题,基于多点式无限共轭调制传递函数测量的实时反馈对准与组装方法成为优选方案。作为调制传递函数系统图案采集的关键成像元件,多光轴聚焦镜头的各项性能在保证测量准确性方面发挥着至关重要的作用。通过建立多光轴聚焦镜头性能指标与待组装手机镜头光学参数之间的关系,采用ZEMAX仿真软件进行光学系统的多重结构设置与像差优化。仿真结果表明,优化后的聚焦镜头体积小、紧凑,对应的子午和弧矢方向调制传递函数曲线均几乎与衍射极限重合,可灵活用于最大视场角 $106^\circ$ ,最高像素4800万手机镜头的多视场点调制传递函数测量及精密组装。

**关键词:**光学设计;无限共轭调制传递函数;精密测量;镜头组装;多光轴成像

中图分类号:O439

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20215012.1222001

## Multi-axis Focusing Lens Design for Precise Assembly of High-resolution Mobile Phone Lens

CHEN Fanghan<sup>1</sup>, ZHAO Guangyu<sup>1</sup>, ZHANG Xiaomei<sup>1</sup>, JIANG Shilong<sup>1</sup>, WEN Zhigang<sup>2</sup>

(1 *Laboratory of Motion Control Technology, PKU-HKUST Shenzhen-Hongkong Institution, Shenzhen, Guangdong 518057, China*)

(2 *Shenzhen Han's Motor S&T Co., Ltd., Shenzhen, Guangdong 518058, China*)

**Abstract:** In the manufacturing process of high-resolution mobile phone lens consisted of glass and plastic material, many problems of assembly between glass lens and plastic lens group were existed such as sensitive to position change, low efficiency and low yield. The optimal proposal based on multi-point infinite conjugation modulation transfer function measurement was adopted to lens alignment and assembly in real-time feedback. As a critical imaging component of chart acquisition for modulation transfer function calculation, performance of multi-axis focusing lens played a significant role in guaranteeing measurement accuracy. The relationship between the design parameters of multi-axis focusing lens and the optical parameters of mobile phone lens to be assembled was established. Multi-configuration setting and aberration optimization of multi-axis focusing optical system were realized by ZEMAX simulation software. Simulation results showed that the size of focusing lens was compact, and both its tangential and sagittal modulation transfer function curves were nearly coincided with diffraction limit. The designed multi-axis focusing lens theoretically could be flexibly exploited to multi-point modulation transfer function

基金项目:国家重点研发计划(No.2018YFB1308604),深圳市技术攻关科技研发资金(No. JSGG20190220164202211)

第一作者:陈方涵(1983-),女,高级工程师,博士,主要研究方向为现代光学技术及工程应用。Email:chenhan620@163.com

通讯作者:蒋仕龙(1968-),男,高级工程师,博士,主要研究方向为精密智能制造关键技术研究与应用。Email:jiangshilong03@126.com

收稿日期:2021-06-09;录用日期:2021-08-16

<http://www.photon.ac.cn>

measurement and precise assembly of high-resolution mobile phone lens up to 48 megapixel, which maximum full field of view angle reached  $106^\circ$ .

**Key words:** Optical design; Infinite conjugation modulation transfer function; Precise measurement; Lens assembly; Multi-axis imaging

**OCIS Codes:** 220.4830; 110.2970; 110.4190; 120.4570

## 0 引言

高分辨率手机镜头作为高品质摄像的重要光学元件,不仅要配合高像素图像传感器清晰成像,还要满足不同场景下的长焦,广角和超广角功能需求。目前手机镜头大多采用纯塑料镜片组装而成,由于塑料材质在像差校正中存在一定局限性,因此像素越高的镜头所含的镜片数越多<sup>[1-2]</sup>,现已达到7P及8P以上。然而,镜片数越多就意味着镜头总长增加,不符合超薄手机的发展趋势,从而促使纯塑料镜头朝着1GNP的玻塑混合镜头发展,即1片玻璃镜片与N片塑料镜片组成的镜头设计方案。该方案充分利用玻璃较塑料材质在色散和折射率上的优势,可使用更少的镜片数实现纯塑料镜头同等程度的像差校正能力,缩短镜头长度。通常远离传感芯片的首片镜片采用玻璃材质,靠近传感芯片的N片镜组为塑料材质。然而对手机镜头而言,玻璃镜片的加工工艺较塑料镜片更为复杂,产量低、成本高,使得混合材料镜头的组装工艺有别于全塑料镜头<sup>[3-4]</sup>。不同于全塑料镜头多镜片依次组立的组装方式,混合式镜头首先采用传统方法将靠近传感芯片的N片镜片依次组立于镜筒中;然后将单玻璃镜片与镜筒进行对准后,将两者以胶合的方式通过镜筒的机械端面完成一体化组装。由于高端镜头的像差对位置公差更为敏感,镜片和镜筒在组装过程中存在的任何细小偏差,如点胶量不当或对准位置不当等都会导致两者之间的偏心量或倾斜量等超出公差范围,恶化镜头像质。若在组装完成之后的检测环节发现像质不合格,则会加剧降低小尺寸玻璃镜片本就不高的生产利用率和手机镜头的良品率,进一步增加镜头制造成本。因此,在组装过程中快速获知镜头像质并根据像质实时调整镜头空间位姿,对高端镜头生产工艺的优化与升级至关重要。

调制传递函数(Modulation Transfer Function, MTF)因能客观、定量地反映光学系统的像差,成为镜头品质保障的可靠手段<sup>[5]</sup>。尤其是随着大容量高速数字计算机的发展和高精度光电测试技术的改进,该方法已有效实现数字化与高速测量,被广泛用于高端手机镜头的像质检测<sup>[6-7]</sup>。由于混合镜头中镜片和镜筒的组装效果最终会通过后续的MTF测量环节进行判定,为提高效率,降低成本,可将镜头组装与像质检测两个环节合二为一。借助高精度MTF的实时分析结果,快速调整镜头至最优空间位置,以实现高效精密对准与组装。对镜头精密组装工艺而言,高精度无限共轭MTF快速测量是实施的重要前提。快速MTF测量源于对指定分划图案的计算与分析<sup>[8]</sup>,典型的光学镜头无限共轭快速MTF测量系统,由分划图案、待测(组装)镜头(Lens Under Test, LUT)、聚焦镜头和成像芯片组成。其中,分划图案位于LUT焦平面处,而聚焦镜头负责将经LUT后的无穷远分划图案像放大后汇聚于成像芯片上进行MTF计算。即成像芯片接收的用于计算LUT各视场点MTF的分划像是经LUT和聚焦镜头共同作用的结果。

由于在高分辨率镜头精密组装中,根据分划像计算的MTF曲线要具有能反映镜片与镜筒敏感位置变化的能力,聚焦镜头自身的像差必须严格校正,以减少待组装镜头MTF的误差来源。因此,具有与LUT同等分辨率的高品质聚焦镜头成为保证精密组装实现的关键组成。然而,手机镜头尺寸虽小,但分辨率高且光圈和视场角都较大,为快速测量LUT整个分划视场内轴上与轴外点的MTF,聚焦镜头的口径也随之增大。不仅为像差校正带来困难,而且过大的体积还会带来空间、加工、装配及成本等一系列问题。为在有限空间内实现大视场高分辨率的分划图案成像与采集,国外的先进设备率先在光路结构上进行了改进,将传统大孔径聚焦镜头全视场成像功能离散化,利用多光轴聚焦镜头的光学布局灵活采集多个不同视场点的分划像,同时计算轴上和轴外MTF<sup>[9-10]</sup>。代表产品为德国全欧光学的ImageMaster PRO系列,由于其中涉及高分辨率成像、精密运动控制及先进分析算法等多个关键技术,价格昂贵;但测量精度高,重复性好,占据了超七成的市场份额,适合手机镜头大批量在线无限共轭MTF测量与精密组装。国内为实现批量化的手机镜头无限共轭快速MTF测量,也有少量采用多光轴聚焦镜头布局的研究积累,但主要侧重于机构的实现与优化<sup>[11-12]</sup>,而分划成像所采用的聚焦镜头几乎为商用的FA系列镜头。其不足之处在于商用镜头的光学和体积参数不能充分匹配待组装镜头的各项需求,使得MTF测量精度和测量

视场点数量均有限,难以满足高品质镜头的检测和组装需求。

多光轴聚焦镜头光学布局及设计源于大视场图像拼接应用中的高分辨率多相机图像采集技术<sup>[13-15]</sup>。为自主掌握高精度MTF先进测量及精密组装技术,本文从大视场分划图案高分辨率成像关键技术研究入手,基于多点采集光路结构,针对行业的具体应用需求设计适用于高分辨率手机镜头无限共轭快速MTF测量的紧凑型多光轴聚焦镜头光学系统,促进高端镜头组装与检测工艺朝着更精密与更智能的方向发展。

## 1 多点式无限共轭快速MTF测量光学系统

无限共轭快速MTF测量系统中的多点式光学布局利用多个子聚焦镜头和成像芯片分布,在有限空间内同时采集待组装镜头多个不同位置视场点的分划像,快速计算轴上与轴外点MTF,光路示意图如图1(a)。与图1(b)所示的采用单个聚焦镜头的典型无限共轭MTF测量示意图相同,多点式光学布局中分划图案仍位于LUT后焦平面处;与之不同的是,经LUT后不同视场点对应的无限远分划像由多个子聚焦镜头与成像芯片分别同时获取,各成像芯片分别位于对应聚焦镜头的焦平面处。采集的各分划像的对比度与清晰度受LUT与各子聚焦镜头一体化光学系统共同调制。其中,与LUT共轴的子聚焦镜头一体化系统负责分划轴上视场点的MTF计算,其余与LUT光轴存在一定倾角 $\omega$ 的子聚焦镜头一体化系统则负责轴外视场点的MTF计算。

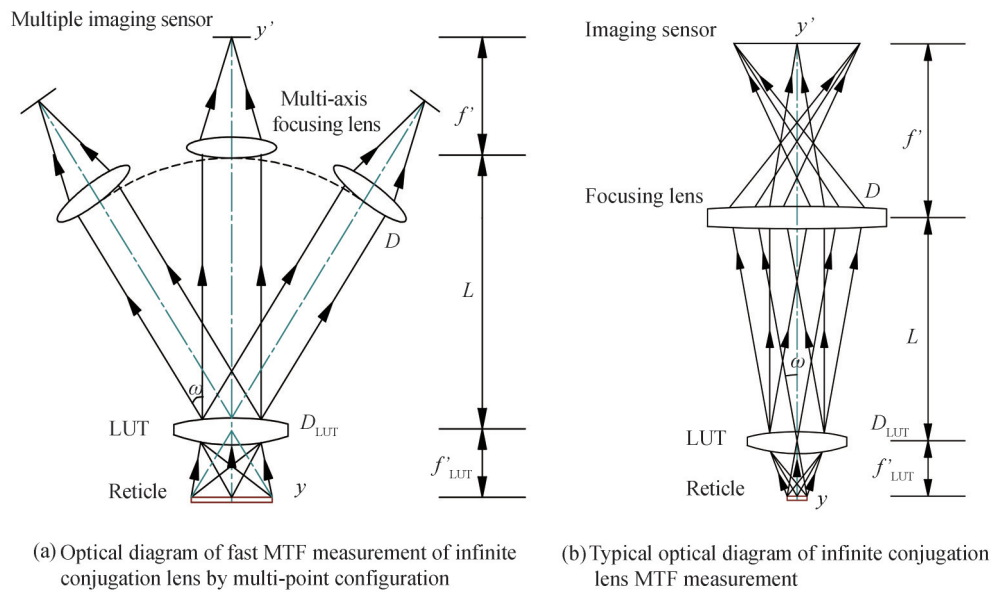


图1 不同光学布局的无限共轭镜头MTF测量光路示意图

Fig.1 Optical diagrams of different optical configuration for infinite conjugation lens MTF measurement

在多点式布局中,聚焦镜头的角度分布参数 $\omega$ 与LUT视场角 $\theta$ 存在对应关系

$$\tan\theta = \tan\omega = y/2f'_{LUT} \quad (1)$$

因此,在保持工作距离 $L$ 不变时,仅通过调整子聚焦镜头的角度 $\omega$ 为

$$\omega = \arctan(y/2f'_{LUT}) \quad (2)$$

便可完成LUT任意视场位置 $y$ 的MTF测量。从而将图1(b)中大尺寸的聚焦镜头转换为多个可灵活调整的小尺寸子镜头,获取整个视场的MTF信息。理论上光学镜头为旋转对称系统,为保证手机镜头像质,测量其中心视场,0.5视场和0.8视场三点的MTF即可。然而实际的待测镜头并非旋转对称,按照对称原则仅测四分之一视场区域的MTF会遗漏整个视场的像质信息,因此为快速准确把控整个视场的LUT成像品质,至少需要九个均匀分布的子聚焦镜头同时测量九个视场点的MTF。其中轴上视场点一个,0.5和0.8视场分别四个,如图2。必要时还可根据镜头品质检测要求的提升,将九点增加至十三点甚至更多视

场点的MTF测量。为灵活适用于不同数量的多视场点测量应用,各聚焦镜头必须具有小型紧凑的特点。

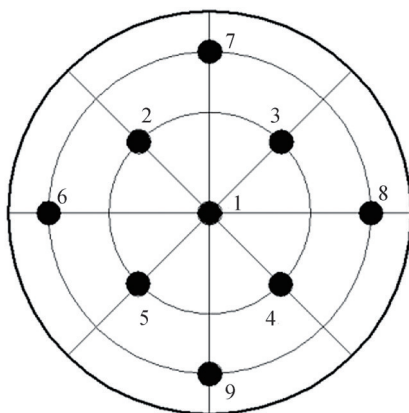


图2 镜头圆形视场内九点式MTF测量位置分布

Fig.2 Nine-point MTF measurement location distribution in circular field of view of lens

## 2 多光轴聚焦透镜设计

### 2.1 主要设计参数计算

广角及超广角高分辨率手机镜头的视场角范围约 $2\theta=78^\circ\sim 106^\circ$ ,对应的焦距 $f'_{LUT}$ 介于3~6 mm之间。为解决因视场过大引起的轴外视场能量不足问题, $F$ 数一般控制在2左右。决定图像清晰度的光学镜头分辨率与接触式图像传感器(Compact Image Sensor, CIS)的像素尺寸有关。从表1给出的分辨率800万到4800万的CIS参数可知,其像素数提升主要表现在芯片尺寸和像素大小的交替升级上,即像素尺寸不变时增大芯片尺寸,或芯片尺寸变化不大时缩小像素尺寸。其中,最高像素4800万CIS芯片的对角线最长,为1/2英寸(1英寸=16毫米);且像素尺寸仅为 $0.8\mu\text{m}$ ,对应的空间频率高达625 lp/mm。

表1 代表性CIS参数

Table 1 Parameters of representative CIS

Pixel number	Product type	Chip size/ inch	Pixel size/ $(\mu\text{m}\times\mu\text{m})$
$8\times 10^6$	IMX 219	1/4.0	$1.12\times 1.12$
$1.3\times 10^7$	IMX 214	1/3.06	$1.12\times 1.12$
$1.6\times 10^7$	IMX 240	1/2.6	$1.12\times 1.12$
$4.8\times 10^7$	IMX 586	1/2.0	$0.8\times 0.8$

为提高多点式MTF测量系统通用性,兼容多种高端规格手机镜头的应用需求,多光轴聚焦镜头的设计指标均对标手机镜头相关参数的上限值。聚焦镜头的主要设计指标包括倾角 $\omega$ ,焦距 $f'$ ,镜头口径 $D$ 以及分辨率。根据手机镜头的最大视场角,可确定倾角 $\omega=\theta_{\max}=53^\circ$ ;分辨率最高可匹配CIS芯片最小像素尺寸 $0.8\mu\text{m}$ 的成像需求。其余各指标则需与LUT进行系统性计算。假设分划图案线宽为 $\sigma_0$ ,成像芯片像素间隔为 $\sigma_i$ ,为保留用于MTF计算的平滑边缘信息,像方采样频率至少为物方的四倍,则系统放大倍率为

$$\beta_c = 4 \cdot \frac{\sigma_i}{\sigma_0} \quad (3)$$

从而可计算聚焦镜头的焦距

$$f' = \beta_c \cdot f'_{LUT} \quad (4)$$

由式(3)和式(4)可知,多光轴聚焦镜头的焦距与图像传感芯片的选取密不可分。综合图像采集速度和精度两个重要因素,设计采用六百万像素的1/1.8英寸CMOS作为成像芯片,其像素分辨率为 $3072\times 2048$ ,像素尺寸 $2.4\mu\text{m}\times 2.4\mu\text{m}$ 。因此,要检测最高像素48M像素的手机镜头,聚焦镜头焦距至少应为12倍LUT的焦距,即

$$f' = 12 \cdot f'_{LUT} \quad (5)$$

4 800万像素镜头通常对应的焦距不超过5.8 mm,因此 $f'$ 不超过69.6 mm,设计时取 $f' = 70$  mm。考虑到系统检测灵活性和成本等因素,各子镜头应可复用。此外,为实现镜头小型化,在有限空间内灵活增减MTF测量点数量,在满足LUT的 $F$ 数( $F \leq 2$ )和一定工作距离 $L$ 的前提下应尽量减少镜头口径 $D$ 与光学长度 $d$ (镜头第一面到像面之间的距离)。为减少聚焦镜头本身像差对一体化系统总体MTF的测量结果,影响LUT MTF分析的准确性,聚焦镜头的MTF曲线要接近衍射极限。综合实际应用需求与相应计算结果后,高分辨率多光轴聚焦镜头光学系统设计参数为:1) 波长范围:可见光波段;2) 焦距: $f' = 70$  mm;3) 工作距离: $L = 70$  mm;4) 镜头口径: $D \leq 20$  mm;5) 镜头光学长度: $d \leq 50$  mm;6) 倾角: $\omega_{\max} = 53^\circ$ ;7) 像差评估标准:MTF接近衍射极限。

## 2.2 设计结果

各聚焦镜头与待组装镜头 $L_{1,2}$ 为一体化成像光学系统,分别采集不同视场点的分划像。在利用ZEMAX建立光学模型时,首先假设 $L_{1,2}$ 是理想光学系统,以此为基础校正聚焦镜头的像差。由于聚焦镜头采集视场的最大倾角 $\omega_{\max} = 53^\circ$ ,以对角线为1/2英寸的48M像素的CIS芯片计算,即 $y = 8$  mm时对应的 $L_{1,2}$ 焦距 $f'_{1,2}$ 约为3 mm。为避免遮挡光阑,一体化系统中 $L_{1,2}$ 位置处的光阑直径应大于实际镜头的数值。为兼顾 $f'_{1,2} = 6$  mm时光圈数 $F = 1.8$ 的对应的大光阑尺寸,取 $L_{1,2}$ 处的孔径光阑直径 $D_{1,2} = 4$  mm。

聚焦镜头的焦距 $f' = 70$  mm,对手机镜头而言属于长焦镜头,采用前正后负的透镜结构实现紧凑光路设计。论文采用四片式初始结构,前两片为正组,后两片为负组,光路图如图3。但初始结构后截距较长,导致光学长度约87.5 mm,不满足设计要求。因此,需基于初始结构将其与 $L_{1,2}$ 进行轴上视场一体化设置与像差校正,并将光学长度控制在50 mm以内。

由于光学设计的前提是 $L_{1,2}$ 为理想薄透镜,不存在像差,因此一体化系统的像差校正结果反映的是聚焦镜头的像差校正情况。像差校正后的一体化系统光路结构如图4所示,两者之间的间隔满足工作距离 $L = 70$  mm的要求。聚焦镜头的第一片透镜由初始结构的单透镜调整为双胶合,系统MTF和畸变像差曲线如图5所示。设计结果表明,聚焦镜头的MTF曲线几乎与衍射重合,畸变在0.1%以内。并且镜头最大口径约为15 mm,后截距缩短为17.5 mm,使光学长度约49 mm,实现了紧凑型设计。

为使聚焦镜在存在大倾角时实现大视场MTF测量,需在轴上一体化光路设计的基础上设置角度的多重

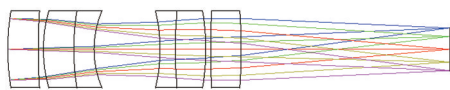


图3 聚焦镜头初始结构

Fig.3 Initial configuration of focusing lens

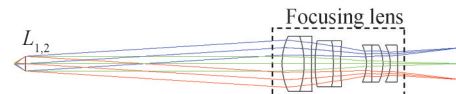


图4 轴上视场一体化成像光路

Fig.4 Integrated imaging optical path of on-axis field of view

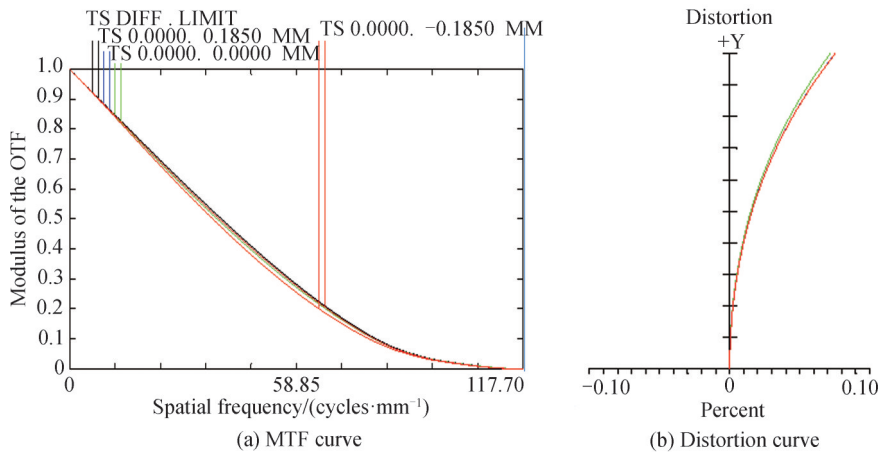


图5 像差校正聚焦镜头一体化系统MTF与畸变曲线

Fig.5 MTF and distortion curve of aberration corrected integrated focusing optics

结构参数进行全视场成像评估。设置时保持 $L_{1,2}$ 与聚焦镜头间距 $L$ 不变,根据不同视场点位置 $y$ 改变多光轴空间位置参数即可。图6所示为 $L=70\text{ mm}$ , $f'_{1,2}=3\text{ mm}$ , $y=8\text{ mm}$ 时,九点式多重结构光路俯视图。图6中含有S1~S9九个聚焦镜头成像系统,S1的倾角 $\omega=0^\circ$ ,负责中心视场点;S2~S5的倾角 $\omega=33.7^\circ$ ,负责对称的四个0.5视场点;S6~S9的倾角 $\omega=53^\circ$ ,负责对称的四个全视场点。

对于 $f'_{\text{LUT}}=3\text{ mm}$ ,物方分辨率 $625\text{ lp/mm}$ 的待组装镜头,对应的像方MTF曲线截止频率约为 $54\text{ lp/mm}$ ,图7分别给出了基于多重结构设置与优化后, $L_{1,2}$ 与聚焦镜头一体化系统在该截止频率处不同视场点位置的MTF曲线。图7(a)为 $\omega=0^\circ$ 时的轴上视场点MTF曲线,在截止频率 $54\text{ lp/mm}$ 处,子午与弧矢方向衍射极限的MTF值均约0.3。优化后的聚焦镜头在该截止频率处的子午与弧矢方向的MTF值也均大于0.3,MTF曲线几乎与衍射极限重合。

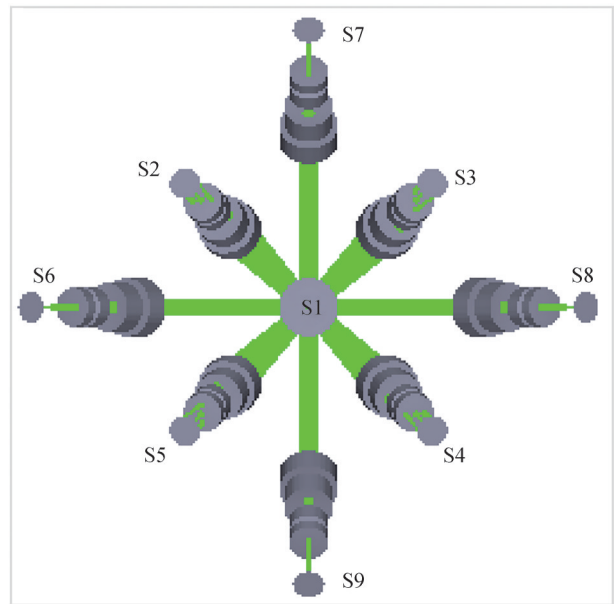


图6 九点式多重结构光路俯视图  
Fig.6 Vertical view of nine-point multi-configuration optical path

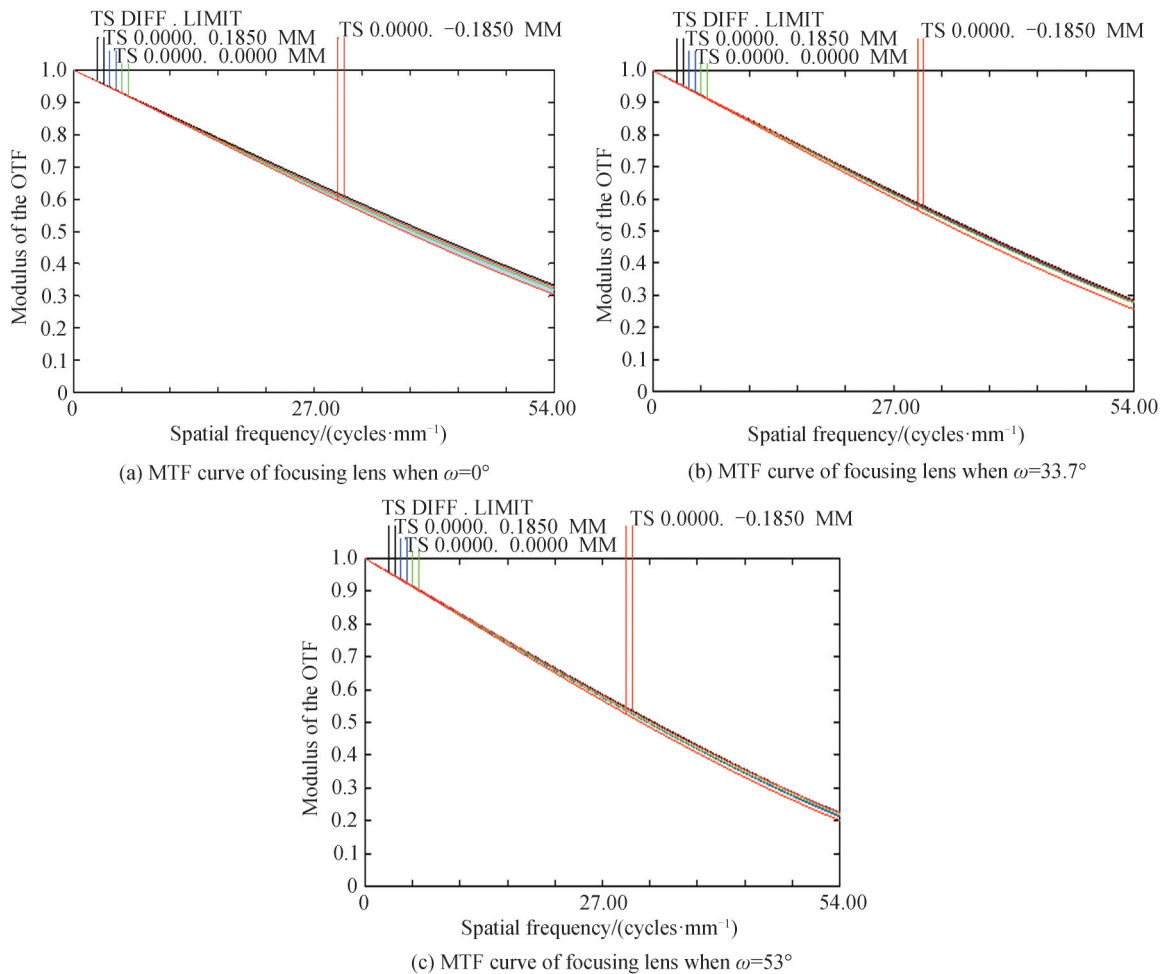


图7 全视场角 $106^\circ$ 以内的优化聚焦镜头MTF曲线  
Fig.7 MTF curve of optimized focusing lens covered full field of view angle  $106^\circ$

图7(b)和(c)分别为倾角为 $\omega = 33.7^\circ$ 和 $\omega = 53^\circ$ 时轴外视场聚焦镜头在截止频率54 lp/mm处的MTF曲线。当倾角 $\omega = 33.7^\circ$ 时,截止频率处子午和弧矢方向的衍射极限均约为0.28;优化后的聚焦镜头在该截止频率处对应的子午和弧矢方向的MTF值也在0.28左右,与衍射极限接近或重合。当倾角 $\omega = 53^\circ$ 时,截止频率处子午和弧矢方向衍射极限均约0.2;优化后的聚焦镜头在该截止频率处对应的子午和弧矢方向的MTF值也在0.2左右,与衍射极限接近或重合。即待组装镜头九个视场点位置经聚焦镜头成像后,在截止频率处的子午和弧矢MTF值均几乎与对应的衍射极限重合。因此,优化后的聚焦镜头在低频、中频和高频都具有良好的成像效果,理论上可满足待组装镜头的MTF测量与组装需求。

### 3 结论

高端手机镜头的制造需要先进的生产工艺作为技术支撑。为解决高分辨率玻塑混合镜头在组装中精度和效率不足等实际问题,本文采用多点式无限共轭MTF检测与组装相结合的方式,针对多光轴聚焦镜头在手机镜头精密组装与测量中的作用,按应用要求对其进行系统性参数计算与紧凑型光学设计。建立手机镜头与多光轴聚焦镜头两者光学参数之间的关系,以满足最高4 800万像素,最大视场角 $106^\circ$ 手机镜头的组装需求为限,采用四片式光学结构进行聚焦镜头的像差优化以及九个视场点的一体化成像质量评估。设计与评估结果表明,优化后的聚焦镜头小型紧凑,在工作距离70 mm处,镜头口径小于15 mm,光学长度小于50 mm,满足设计要求;且各视场点聚焦镜头的子午和弧矢方向MTF曲线均与对应的衍射极限接近或重合,最大程度减少了因聚焦镜头自身像差校正不足导致的手手机镜头MTF计算与组装精度的影响,从而保证手机镜头精密组装位置反馈数据的准确性。

**致谢:**感谢深港产学研基地(北京大学香港科技大学深圳研修院)产学研基金(HT-JD-CXY-201901)对项目提供的资金支持。

#### 参考文献

- [1] CAO Yiqing, SHEN Zhijuan, ZHANG Ruihua. Design of high resolution mobile phone lens with large aperture[J]. Journal of Optoelectronics Laser, 2020, (6):600-606.  
曹一青,沈志娟,张瑞华.高分辨率大口径手机镜头设计[J].光电子·激光,2020,(6):600-606.
- [2] XUE Leitao, LI Feng. Design of thin and wide-angle lens for 8 mega-pixel mobile phone camera[J]. Laser&Optoelectronics Progress, 2015, 52(1): 0102204.  
薛雷涛,林峰.800万像素超薄广角手机镜头设计[J].激光与光电子学进展,2015,52(1):0102204.
- [3] LI Bin, LI Dingwei. A mobile phone lens assembly machine: China, 020218867534[P]. 2020-09-02.  
李兵,李丁伟.一种手机镜头组装机:中国,2020218867534[P].2020-09-02.
- [4] DOU Xiuxun. Design and manufacturing process of five cell phone lens[D]. Zhenjiang:Jiangsu University, 2016.  
豆修浔.五单元手机镜头的设计及其制造工艺[D].镇江:江苏大学,2016.
- [5] YE Chunfang. Research on fast MTF measuring instrument for optical system[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2006.  
叶春芳.光学系统MTF快速测量仪的研究[D].杭州:浙江大学,2006.
- [6] VIALLEFONT-ROBINET F, HELDER D, FRAISSE R, et al. Comparison of MTF measurements using edge method: towards reference data set[J]. Optical Express, 2018, 26(26): 33625-33648.
- [7] ZHU Jianxin, WU Guocheng. Measuring method of mobile phone lens MTF[J]. Optical Instruments, 2006, 28(2):17-21.  
朱建新,吴国诚.拍照手机镜头MTF的测量方法[J].光学仪器,2006,28(2):17-21.
- [8] BACKMAN S, MAKYNEN A, KOLEHMAINEN T, et al. Random target method for fast MTF inspection[J]. Optics Express, 2004, 12(12):2610-2616.
- [9] DAHL M, HEINISCH J, KREY S, et al. Ultra-fast MTF test for high-volume production of CMOS imaging cameras [C]. SPIE, 2003, 5180(5):611-636.
- [10] AHARON O. Mass production MTF testing machine: US, 15/218,125[P]. 2016-07-25.
- [11] HUANG Shengdi, SHAO Wen, CAO Zhaolou, et al. The MTF measurement device for lens production, China, 2017203134365[P]. 2017-03-28.  
黄胜弟,少文,曹兆楼,等.一种用于镜片生产的MTF检测装置:中国,2017203134365[P].2017-03-28.
- [12] BAI Xuekun, ZHUANG Huaigang, TAN Yu. Device and method for measuring modulation transfer function of optical lens with infinite conjugation optical path: China, 201610078327X[P]. 2016-02-03.  
白学坤,庄怀港,谭羽.无限共轭光路测量光学镜头的调制传递函数的装置及方法:中国,201610078327X[P].2016-02-03.
- [13] AHUJA N, BOSE N. Design of large field-of-view high-resolution miniaturized imaging system[J]. EURASIP Journal on Advances Signal Processing, 2007, 59546:1-10.

- [14] LIU Fei, WEI Yazhe, HAN Pingli, et al. Design of monocentric wide field-of-view and high-resolution computational imaging system[J]. Acta Physica Sinica, 2019, 68(8):101-110.  
刘飞,魏雅喆,韩平丽,等.基于共心球透镜的多尺度广域高分辨率计算成像系统设计[J].物理学报,2019,68(8):101-110.
- [15] HOU Xibao, BAI Tingzhu. Research on large field of view imaging system design using multi-sensor array and key technologies[J]. Optical Technique, 2013,39(3): 276-279.  
侯喜报,白廷柱.多传感器大视场成像系统设计及关键技术研究[J].光学技术,2013,39(3):276-279.