

文章编号 1004-924X(2025)18-2844-13

## 基于蒙特卡洛的手机变焦镜头设计

郭佳健<sup>1,2,3</sup>, 谢元昊<sup>1,2,3</sup>, 牟帅威<sup>1,2,3</sup>, 张新<sup>1,3</sup>, 刘铭鑫<sup>1,3</sup>,  
史广维<sup>1,3</sup>, 赵尚男<sup>1,3\*</sup>

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;  
2. 中国科学院大学, 北京 100049;  
3. 光学系统先进制造全国重点实验室, 吉林 长春 130033)

**摘要:**随着消费电子产品的不断升级,用户对高性能、小型化变焦光学成像系统的需求日益迫切。对于变焦系统,其组份光焦度分布、运动曲线等一阶配置对成像性能影响显著,但一阶配置方案的选择难以通过简单解析的方法解决,这增加了轻量化变焦镜头的设计难度。为了全局性地评估变焦镜头一阶配置的潜在性能,探索变焦镜头轻量化的设计方法,本文将蒙特卡洛搜索程序用于寻找变焦系统最佳一阶配置方案中。首先,基于蒙特卡洛生成各组份焦距,筛选满足变焦约束方程的有效分配方案。然后,根据有效方案生成镜头设计文件进行真实光线追迹和快速优化来评估方案性能,筛选出性能优异的光焦度组合方案。最后,以手机变焦镜头为例,将性能优异的方案作为初始结构,设计了一款F数恒定为2.9、等效焦距达61~183 mm、总长90 mm的紧凑型变焦镜头,其变焦曲线平滑,各视场、各焦距的MTF均优于0.45@80 lp/mm和0.15@160 lp/mm,畸变低于4%,相对照度高于20%,相较于常规变焦镜头,在轻量化方面具备明显优势。设计结果说明本文提出的基于蒙特卡洛生成一阶配置和真实光线追迹评估方法的有效性,为紧凑型变焦镜头设计提供了新的解决思路。

**关键词:** 光学设计; 变焦镜头; 蒙特卡洛; 自动化设计

**中图分类号:** O435 **文献标识码:** A

**doi:** 10.37188/OPE.20253318.2844

**CSTR:** 32169.14.OPE.20253318.2844

## Monte Carlo based smartphone zoom lenses design

GUO Jiajian<sup>1,2,3</sup>, XIE Yuanhao<sup>1,2,3</sup>, MU Shuaiwei<sup>1,2,3</sup>, ZHANG Xin<sup>1,3</sup>,  
LIU Mingxin<sup>1,3</sup>, SHI Guangwei<sup>1,3</sup>, ZHAO Shangnan<sup>1,3\*</sup>

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences,  
Changchun 130033, China;  
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;  
3. State Key Laboratory of Advanced Manufacturing for Optical Systems, Changchun 130033, China)  
\* Corresponding author, E-mail: 18810575846@163.com

**Abstract:** With the advancement of consumer electronics, there is an increasing demand for high-performance, miniaturized zoom lenses. In zoom lenses, the distribution of optical power among components and their zoom cam curve-collectively known as first-order configurations-significantly influence imaging

收稿日期: 2025-04-16; 修订日期: 2025-05-29.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 62475122); 青年科学基金资助项目(No. 62005271)

performance. However, selecting optimal first-order configurations is challenging through simple analytical methods, thereby complicating the design of lightweight zoom lenses. To globally assess the potential performance of first-order configurations in zoom lenses and explore design methodologies for lightweight zoom lenses, this study employed a Monte Carlo search algorithm to identify optimal first-order configurations. Initially, focal lengths for each component were generated based on the Monte Carlo method, and configurations satisfying the zoom constraint equations were filtered. Subsequently, lens design files were created for the valid configurations, followed by ray tracing and rapid optimization to evaluate performance, ultimately selecting configurations with superior optical power distributions. Finally, taking a smartphone zoom lens as an example, a compact zoom lens was designed using the high-performance configuration as the initial structure. This lens maintained a constant F-number of 2.9, achieved an equivalent focal length range of 61-183 mm, and had a total track length of 90 mm. It featured smooth zoom cam curve, modulation transfer function (MTF) values exceeding 0.45 at 80 lp/mm and 0.15 at 160 lp/mm across all fields of view and focal lengths, distortion below 4%, and relative illumination above 20%. Compared to conventional zoom lenses, it offered significant advantages in terms of weight reduction. The design results demonstrate the effectiveness of the proposed method, which combines Monte Carlo-generated first-order configurations with ray tracing evaluations, providing a novel approach for designing compact zoom lenses.

**Key words:** optical design; zoom lenses; Monte Carlo; automatic design

## 1 引言

变焦镜头作为一种能够在一定范围内连续改变焦距的光学系统,已广泛应用于摄影摄像<sup>[1]</sup>、机器视觉<sup>[2]</sup>、遥感观测<sup>[3]</sup>等诸多领域。相较于传统定焦镜头,变焦镜头具备更高的灵活性和适用性,能够在不改变物像距离的情况下,通过调整镜片组之间的位置实现焦距的变化,从而获得不同的视场大小和放大倍率。这种特性使得变焦镜头特别适合于复杂多变的应用场景,避免了更换镜头的繁琐,提高了系统的便携性与响应速度<sup>[4, 5]</sup>。

20 世纪早期的变焦镜头只有某几个焦段合焦,是不连续的变焦镜头<sup>[1]</sup>。1950 年左右,人们开始使用足够精确的凸轮让两个及以上的移动组份独立运动,这意味着可以在保持稳定像面的同时改变变焦镜头的焦距,这就是机械补偿变焦系统。其至少需要两个光学镜组独立移动:变倍组用于改变焦距,补偿组用于保持图像位置不变。此外,为了实现像差校正、对焦、保持系统总长不变等功能,设计中通常还会加入或固定或移动的附加镜组<sup>[6]</sup>。近年来,随着消费电子产品的不断升级,用户对高性能、小尺寸光学成像系统

的需求日益迫切,体积庞大、结构复杂的传统变焦镜头难以适用于智能手机这种小尺寸设备。目前市面上大多数宣传具有光学变焦功能的智能手机,实际上是使用了几个焦距不同但固定的镜头,使用切换镜头的方法并结合数码变焦(裁切)实现变焦功能,并不是完全意义上的光学变焦。因此,如何在维持高性能成像的同时实现镜头的小型化、轻量化成为关键技术难题。最近,人们通过应用折叠光路<sup>[7-9]</sup>等创新的光学结构、液体透镜<sup>[10-12]</sup>等新型光学材料,使得小型化变焦镜头的研究取得了一些进展。

变焦镜头的固定、运动组份可以有多种光焦度组合形式,这些组合与组份运动曲线、总长、后截距等一阶参数被称为变焦镜头的一阶配置。一阶配置对系统性能有很大影响,比如镜片口径和像差校正潜力等,因此必须在设计初期就对其给予充分重视。然而,复杂变焦镜头的一阶配置是一个变量过多、无法简单解析解决的问题<sup>[13]</sup>,多年来,已经有众多研究者从光学设计实践<sup>[14-15]</sup>和变焦系统数学模型<sup>[5-6, 16-17]</sup>对一阶配置展开了探索和研究。人们也将更先进的算法应用到变焦系统一阶配置求解过程中,如遗传算法<sup>[18]</sup>。然而,这些方法存在以下局限:要么未能在设计初

期对所选结构的像差校正潜力进行系统评估;要么对初始结构的选取严重依赖于经验判断;要么未能解析地建立变焦组份的约束方程。

本文在传统一阶配置变焦系统数学模型的基础上,提出了一种基于蒙特卡洛的手机变焦镜头设计方法,对可能的解空间进行全面分析。给定变焦系统规格要求后,首先随机生成各组份焦距,筛选满足变焦约束方程的有效一阶配置方案。然后生成具有真实材料、非零厚度透镜的镜头设计文件,对所有生成的有效一阶配置进行光线追迹验证与性能评估,最终可获得优良的一阶设计起始点。相较于传统依赖经验或基于遗传算法的变焦镜头设计方法,本文提出的蒙特卡洛策略能够在设计初期、从全局角度评估参数空间中一阶光学结构的像差校正潜力,并通过引入解析形式的约束方程,严格保证像面位置的稳定性。本方法既能为设计师提供合理的变焦初始结构,也能为探索全新的高性能、小型化手机变焦镜头架构奠定基础。

## 2 变焦镜头一阶配置的运动原理

本节首先推导描述变焦镜头一阶配置运动的微分方程方法<sup>[16]</sup>,然后介绍计算一阶配置的基本流程。

### 2.1 微分方程法的原理

以前固定组 $\phi_1$ 、变倍组 $\phi_2$ 、补偿组 $\phi_3$ 、后固定组 $\phi_4$ 的机械补偿为例,如图1所示,角标 $s, l$ 分别表示短焦状态和长焦状态。由于只有运动组份才产生像面位移,所以先只分析运动组份 $\phi_2$ 和 $\phi_3$ 。规定向右为正方向。 $\phi_2, \phi_3$ 的移动量 $dq, d\Delta$ 与他们的横向放大倍率 $m_2, m_3$ 的关系为:

$$dq = \frac{f'_2}{m_2^2} dm_2, \quad (1)$$

$$d\Delta = f'_3 dm_3, \quad (2)$$

其中,  $f'_2, f'_3$  是  $\phi_2, \phi_3$  的焦距。以倍率  $m$  表示的描述变焦过程像面位置不变的方程为:

$$\frac{(1-m_2^2)}{m_2^2} f'_2 dm_2 + \frac{(1-m_3^2)}{m_3^2} f'_3 dm_3 = 0. \quad (3)$$

从式(3)可知一般情况下各组份均以  $\frac{1-m^2}{m^2} f' dm$  的形式出现在方程中,这一形式其

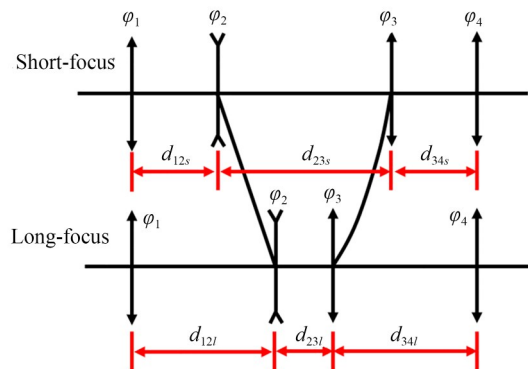


图1 四组份的机械补偿变焦系统一阶配置

Fig. 1 First-order configuration of mechanically compensated zoom system with four components

实就是单个组份共轭距的微分:

$$dL = d \left[ f' \left( 2 - \frac{1}{m} - m \right) \right] = \frac{1-m^2}{m^2} f' dm. \quad (4)$$

所以式(3)其实就是  $\sum_i \Delta L_i = 0$ , 即各个组份引起的共轭距改变量应能完全抵消, 这就是微分方程法名称的由来。

设初始位置为长焦处:

$$m_2 = m_{2l}, m_3 = m_{3l}, \quad (5)$$

则式(3)的通解为:

$$f'_2 \left( \frac{1}{m_2} - \frac{1}{m_{2l}} + m_2 - m_{2l} \right) + f'_3 \left( \frac{1}{m_3} - \frac{1}{m_{3l}} + m_3 - m_{3l} \right) = 0, \quad (6)$$

构成关于  $m_3$  的二次方程:

$$m_3^2 - bm_3 + 1 = 0, \quad (7)$$

其中:

$$b = -\frac{f'_2}{f'_3} \left( \frac{1}{m_2} - \frac{1}{m_{2l}} + m_2 - m_{2l} \right) + \left( \frac{1}{m_{3l}} + m_{3l} \right). \quad (8)$$

当  $m_2 = -1$  时,  $|b|$  取最小值。注意到只有  $|b| \geq 2$  时,  $m_3$  才有解, 此时  $m_3$  的两个根为:

$$m_{31} = \frac{b + \sqrt{b^2 - 4}}{2}, m_{32} = \frac{b - \sqrt{b^2 - 4}}{2}. \quad (9)$$

注意到两个根  $m_{31}, m_{32}$  互为倒数, 且  $b, m_2$  和  $m_3$  时刻同号。对于负补偿系统,  $b > 2$ , 则  $m_{31} > 1, 0 < m_{32} < 1$ ; 对于正补偿系统,  $b < -2$ ,  $-1 < m_{31} < 0, m_{32} < -1$ 。因此可以根据  $b, m_{3l}$  的值判断任意时刻补偿组  $\phi_3$  的倍率  $m_3$  处于两个解中的哪一个。而对于正组补偿系统, 变焦运动

曲线可以在两个解重合的位置(通常是靠近中间焦距的位置),从一个解平滑过渡到另一个解,使补偿组在变焦过程中始终单调运动,实现大变焦比的同时让结构更加紧凑,也就是“换根”操作,见图 2,参考书籍<sup>[16]</sup>中更有详细的讨论。随着组份倍率变化,直到系统的总变焦比(长焦/此刻

焦距):

$$\Gamma = \frac{m_{2l}m_{3l}}{m_2m_3}. \quad (10)$$

满足设计要求时,可由式(1)和式(2)对  $m_2$ ,  $m_3$  积分得到变倍组  $\phi_2$  移动量  $q$  和补偿组  $\phi_3$  移动量  $\Delta$  的解析表达式,进而计算变焦曲线。

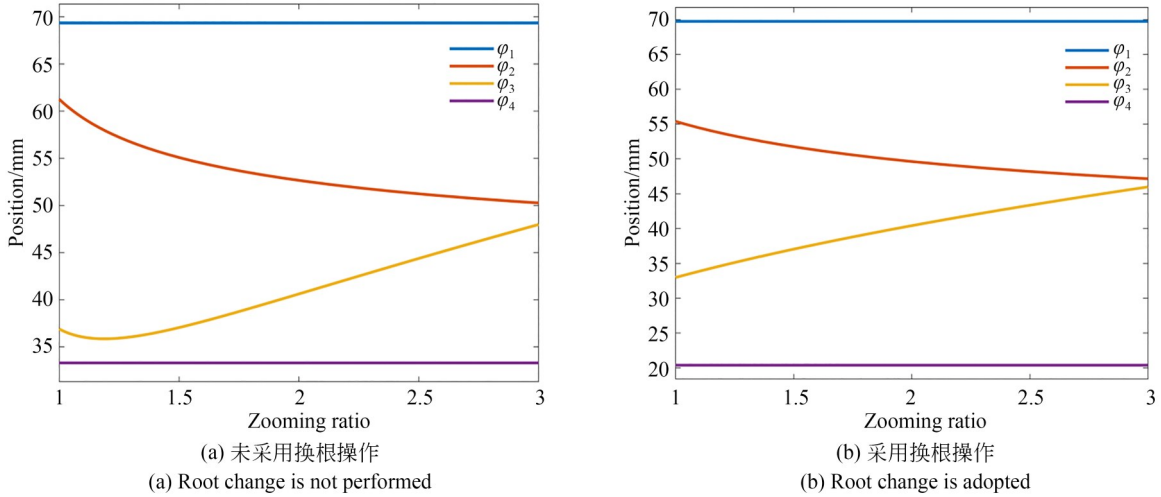


图 2 PNPP 解空间中一阶配置方案运动示意图

Fig. 2 Motion diagram of two first-order configurations in PNPP solution space

用微分方程法可以分析很多类型的变焦结构的一阶配置曲线<sup>[16]</sup>,比如变焦核由相邻的两运动组份组成、由三组份组成且两移动组份被固定组隔开、由三个相邻的运动组份组成、双组联动型等等。无论系统由多少个相邻的运动组份组成变焦核,无论其中几个运动组份是否固联,系统变焦方程均为:

$$\sum_i \Delta L_i = \frac{1 - m_i^2}{m_i^2} f'_i dm_i = 0. \quad (11)$$

## 2.2 一阶配置运动方案计算流程

以图 1 所示的机械补偿为例,长焦时为初始状态,规定向右为正方向。已知:变倍组  $\phi_2$  的焦距  $f'_2$ ; 补偿组  $\phi_3$  的焦距  $f'_3$ ; 变倍组  $\phi_2$  长焦时的倍率  $m_{2l}$ ; 变倍组  $\phi_2$  和补偿组  $\phi_3$  长焦时的间隔  $d_{23l}$ ; 后固定组  $\phi_4$  的焦距  $f'_4$ 。则补偿组  $\phi_3$  长焦时的倍率为:

$$m_{3l} = \frac{f'_3}{f'_2(1 - m_{2l}) - d_{23l} + f'_3}. \quad (12)$$

计算流程如下:

(a) 给定变倍组  $\phi_2$  的位移  $q_2$ , 由式(1)积分可

得此时变倍组  $\phi_2$  的倍率:

$$m_2 = \frac{1}{\frac{1}{m_{2l}} - \frac{q_2}{f'_2}}. \quad (13)$$

(b) 由式(8)计算  $b$ , 并验证是否  $|b|_{\min} \geq 2$  (对于正补偿组的情况, 此时  $m_2 = -1$ ), 这是有解的条件。若不满足可通过调整  $d_{23l}$  来改变  $m_{3l}$ , 从而使  $|b|_{\min} \geq 2$  来消除无解。

(c) 由式(9)计算补偿组  $\phi_3$  的两个倍率  $m_{31}$  和  $m_{32}$ , 并根据  $b, m_{3l}$  的值判断初始位置(长焦时)补偿组  $\phi_3$  处于两条补偿曲线中的哪一条。对于正补偿组的情况,  $-1 < m_{31} < 0, m_{32} < -1, q_2$  由 0 变为绝对值大的负值的过程中,  $m_2$  由绝对值大的负值, 经过  $-1$ , 变向绝对值小的负值方向移动。由最速变焦曲线理论,  $|m_2|$  和  $|m_3|$  的单调性一致时变焦迅速, 所以  $|m_3|$  也应减小, 而  $m_2, m_3$  同号, 所以  $m_{3l}$  最好取小于  $-1$  的值。

(d) 由式(2)积分可得补偿组  $\phi_3$  的位移:

$$\begin{cases} \Delta_1 = f'_3(m_{31} - m_{3l}) \\ \Delta_2 = f'_3(m_{32} - m_{3l}) \end{cases}. \quad (14)$$

(e) 由式(10)得到系统的总变焦比,系统从长焦位置开始运动至短焦位置,此时变焦比  $\Gamma$  从 1 增大至预定的总变焦比。

(f) 前固定组  $\phi_1$  的焦距  $f'_1$ 。系统从长焦位置开始运动至短焦位置,变倍组  $\phi_2$  从最右端移动至最左端,设此时固定组  $\phi_1$  和变倍组  $\phi_2$  间距为  $d_{12s}$ ,有:

$$f'_1 = d_{12s} + \frac{f'_2(1 - m_{2s})}{m_{2s}}. \quad (15)$$

(g) 计算系统总焦距  $f'$ 、后截距  $BFL$ 、筒长  $OAL$ 、总长  $TOTR$ 。系统总焦距  $f'$  可用近轴光线追迹方法计算得:

$$R_1 = \begin{pmatrix} 1 & \frac{1}{f'_1} \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, R_2 = \begin{pmatrix} 1 & \frac{1}{f'_2} \\ 0 & 1 \end{pmatrix},$$

$$R_3 = \begin{pmatrix} 1 & \frac{1}{f'_3} \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, R_4 = \begin{pmatrix} 1 & \frac{1}{f'_4} \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (16)$$

$$D_1 = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\left(d_{12s} + |q_2|_{\max}\right) & 1 \end{pmatrix}, D_2 = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -d_{23l} & 1 \end{pmatrix},$$

$$D_3 = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\left(|\Delta|_{\max} + d_{34s}\right) & 1 \end{pmatrix}, \quad (17)$$

$$M = R_4 D_3 R_3 D_2 R_2 D_1 R_1 = \begin{pmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{pmatrix}, \quad (18)$$

$$f' = \frac{1}{M_{12}}. \quad (19)$$

系统后截距  $BFL$  可由 0 视场的近轴光线追迹得到,设该光线高度为 1,则:

$$A = M \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_{11} \\ A_{21} \end{pmatrix}. \quad (20)$$

光线从最后一个透镜射出时距光轴的高度为  $A_{11}$ 、角度为  $A_{21}$ ,则后截距  $BFL$  为:

$$BFL = \frac{A_{21}}{A_{11}}. \quad (21)$$

系统筒长  $OAL$  为:

$$OAL = d_{12s} + |q_2|_{\max} + d_{23l} + |\Delta|_{\max} + d_{34s}, \quad (22)$$

系统总长  $TOTR$  为:

$$TOTR = OAL + BFL. \quad (23)$$

在该计算流程中,除了基于微分方程解析求解所获得的运动轨迹外,更为关键的是步骤(g)中引入了近轴光线追迹方法(即矩阵光学分析),以计算系统的后截距与总长等关键一阶光学参

数。借助这些结果,可以在已知四组镜片焦距的前提下,构建对应的四组变焦系统的一阶光学结构与运动方案。

### 3 蒙特卡洛程序设计逻辑

本文设计的程序分为两个部分:蒙特卡洛生成一阶配置方案和真实光线追迹评估。前者生成的众多一阶配置方案被输入至后者,筛选可光线追迹的配置方案。

#### 3.1 一阶配置方案生成程序

变焦系统的全局设计空间由各组份光焦度符号所有可能的组合构成,依据镜组数量而变。例如,在图 1 中,光焦度符号顺序为 PNPP,因此其所在的解空间记为 PNPP。对于 4 组份变焦系统,其全局设计空间共包含  $2^4 = 16$  个解空间。蒙特卡洛生成一阶配置方案的目的是从上述众多一阶解空间中,全局性地筛选出满足微分方程法约束下的一阶配置方案。

蒙特卡洛搜索提供了一种高效且信息量丰富的方式,可以同时检视各个解空间中的所有一阶配置方案,避免了逐个局部检查的低效方式。该程序的流程如图 3 所示,首先输入约束条件的边界:各组份焦距、变焦比、总长和后截距的最小值与最大值。程序随后使用蒙特卡洛方法,在每个参数的指定范围内随机选取数值,每组随机参数会按照 2.2 节的计算流程筛选满足约束的一阶配置方案。图 2 显示了 PNPP 解空间中两个一阶配置方案运动曲线,横轴为系统有效焦距的变

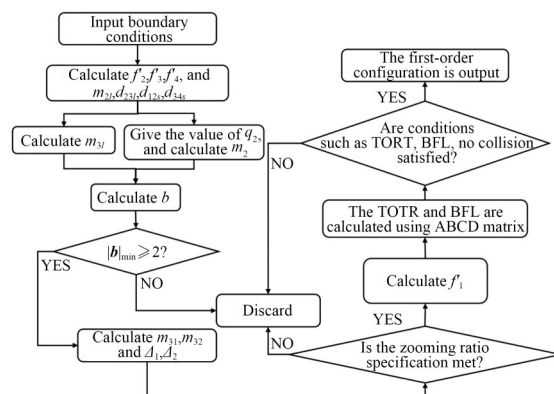


图 3 蒙特卡洛生成一阶配置方案的流程图

Fig. 3 Flowchart of generating first-order configurations with Monte Carlo

化,纵轴为各镜组的 $z$ 方向位置, $z=0$  mm 对应于像面位置,图 2(a)和图 2(b)分别代表了未采用和采用换根操作的配置,在机械上均可实现。

3.2 真实光线追迹与优化评估程序

使用微分方程法生成的一阶配置认为各透镜组是近轴理想透镜,未考虑轴外视场、材料色散、镜片口径限制、像差等因素的影响。此外,一阶配置运动曲线中的组份间隔实际上是组份主平面的间隔,与透镜组的物理间隔并不等效,这在后续设计时可能会引起镜片相撞。因此在生成一阶配置方案后,程序的下一步是对所有一阶配置方案进行厚透镜实体化,识别哪些配置是可以成功光线追迹的,优化系统至像差最小的状态,评估方案的可行性和潜在性能。

光线追迹的自动化是通过 MATLAB 与光学设计软件 CODE V 通信完成的。对每个一阶配置建模为厚透镜系统。每个组份由材料为真实玻璃的一片单透镜组成,初始厚度为 2 mm,两侧曲率半径对称,使用空气中厚透镜焦距公式:

$$\frac{1}{f'}=(n-1)\left[\frac{1}{R_1}-\frac{1}{R_2}+\frac{(n-1)d}{nR_1R_2}\right]. \quad (24)$$

计算曲率半径,其中 $d$ 为透镜厚度, $n$ 为透镜折射率。设置 2 个焦段:最长焦和最短焦,设置波长为复色光,每个焦段采样 5 个视场。光圈、视场(真实像高)初始值很小,随着优化进程逐步扩大至接近指标所要求的值。将所有镜片曲率半径、厚度和空气厚度设为变量,约束镜组焦距、系统焦距保持不变,以确保与一阶配置方案一致。优化完成后,首先计算每个配置在不同视场和变焦位置下的光斑直径均方根(Root Mean Square, RMS),再将所有 RMS 值求和后取平方根(Root Sum Square, RSS),以此作为综合评价指标之一。这种评价方式着重考虑了在某个变焦位置表现良好而在另一个位置表现不佳的配置,有利于保证成像性能的一致性。最终可获得一系列可分析、根据性能排序的镜头文件,作为有前景的光学设计优选起点。一个较好的起点如图 4(a)所示,其具体参数如表 1 和表 2 所示,所有表面均为球面, $F$  数为 4.5,像高为 8.19 mm。

程序在上述建模、优化过程的同时检测是否出现光线追迹失败,如图 4(b)。一旦光线追迹失

表 1 一个有前景的设计起点参数

Tab. 1 A promising design starting parameters (mm)

| Surface Number | Radius | Thickness | Material |
|----------------|--------|-----------|----------|
| 1              | 19.48  | 6.43      | BK7      |
| 2              | 616.45 | D1        | 空气       |
| 3              | -22.45 | 0.10      | BK7      |
| 4              | 10.91  | D2        | 空气       |
| 5              | 30.77  | 2.48      | BK7      |
| 6              | -25.63 | D3        | 空气       |
| 7              | -73.24 | 0.78      | BK7      |
| 8              | -26.79 | 37.08     | 空气       |

表 2 变焦参数

Tab. 2 Zoom parameters (mm)

| Spacing | Focal length/<br>23.73 mm | Focal length/<br>68.15 mm |
|---------|---------------------------|---------------------------|
| D1      | 1.69                      | 12.33                     |
| D2      | 20.50                     | 2.18                      |
| D3      | 0.50                      | 8.18                      |

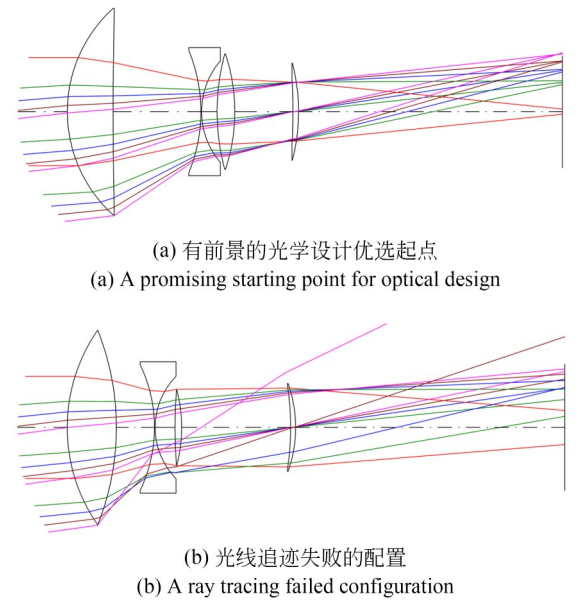


图 4 一阶配置经过真实光线追迹与优化后的 2D 图,焦段为长焦

Fig.4 2D images of first-order configurations after ray tracing and optimization, with longest zoom focal length

败,该一阶配置将被标记为无效,不再继续进行优化与评估。光线追迹失败主要是由于系统像

差和光阑像差过大,前者导致光线无法与某个光学面相交,甚至在某些面发生反射或全反射,后者导致光线无法从入瞳中心通过孔径光阑再到出瞳中心。虽然部分光阑像差可通过调整光阑位置来减小,但当前结构要求F数恒定(见下文设计参数),光阑必须位于固定组份中,因此该方法不可行。此外,除了光线追迹失败的配置会被标记为无效,那些光线追迹成功但在优化过程中不收敛的配置也会被标记为无效。

RMS 光斑直径的 RSS 以及各组份光焦度、总长、后截距等一阶参数可以提供关于设计的成像质量和系统外形尺寸的丰富信息,为每个一阶配置建立全面的性能画像。性能优异的一阶配置将作为设计的初始结构,以便加入更多变量进一步优化。

4 仿真实验与设计结果

4.1 变焦系统规格与约束边界

为验证基于蒙特卡洛的变焦镜头设计方法的可行性与合理性,依据上述理论与方法,完成应用于智能手机的紧凑型变焦镜头设计实例。结合目前市场上主流品牌手机所搭载常用焦段的镜头,尤其是长焦端的应用需求<sup>[19]</sup>,确定本文设计的手机变焦镜头指标参数如表 3 所示。该系统采用 1 英寸、像元尺寸为  $1.4\text{ }\mu\text{m}\times 1.4\text{ }\mu\text{m}$  的 CMOS 传感器,目前,大多数手机厂商采用像素四合一技术,以达到提高画面纯净度、增强弱光拍摄能力的目的,故等效像元尺寸可视为  $2.8\text{ }\mu\text{m}\times 2.8\text{ }\mu\text{m}$ ,则 MTF 截止频率为 160 lp/mm。此外,表中等效焦距的意义是,当传感器尺寸与全画幅传感器尺寸 ( $36\text{ mm}\times 24\text{ mm}$ )一致时镜头对应的焦距,即视场角相同,计算公式为:

$$f'_E = \frac{\sqrt{36^2 + 24^2}}{A} f', \quad (25)$$

其中: $f'$ 为系统实际有效焦距, $f'_E$ 为等效焦距, $A$ 为传感器半对角线尺寸。本文的变焦系统规格也与全画幅相机常用的“大三元”变焦镜头之一的长焦焦段镜头(焦距 70~200 mm, $F$  数恒定为 2.8)十分接近,而这类镜头的总长通常在 210 mm 以上<sup>[20]</sup>。作为对比,本文将总长限制在 90 mm 以内。

表 4 给出了蒙特卡洛生成一阶配置方案的约

表 3 变焦光学系统设计参数

Tab. 3 Design parameters of zoom lenses

| Parameter                                    | Value        |
|----------------------------------------------|--------------|
| Half image height/mm                         | 8.19         |
| Effective focal length/mm                    | 23.10~69.27  |
| Equivalent focal length/mm                   | 61.01~182.94 |
| F-number                                     | 2.9          |
| Total optical length/mm                      | $\leq 90$    |
| Back focal length/mm                         | $\geq 1$     |
| Reference wavelength range/nm                | 470~650      |
| Distortion                                   | $< 4\%$      |
| Relative illumination                        | $> 20\%$     |
| MTF evaluation frequency/lp•mm <sup>-1</sup> | 80 and 160   |

束,这些约束的设定考虑了多个因素。首先总长和后截距除了满足系统规格要求外,还要留出一定余量,这是由于后续设计将从理想透镜过渡到厚透镜。其次每个组份焦距范围跨度越大,能探索的设计空间越广,同时也会浪费计算资源和时间在没有潜力的一阶配置上。

表 4 蒙特卡洛生成一阶配置方案的约束边界,焦距无符号

Tab. 4 Constrained of the first-order configuration with Monte Carlo, and the focal length is unsigned

| Parameter                        | Value/mm |
|----------------------------------|----------|
| Focal length range per component | 5~100    |
| Total length                     | $< 70$   |
| Back focal length                | $> 3$    |
| Minimum inter-component spacing  | 2        |

4.2 实验结果

通过蒙特卡洛方法对 2.1 节的 4 组份正组机械补偿变焦系统进行了全面搜索,即 XNPX 设计空间,其中 X 表示光焦度不定,在此基础上考虑是否采用换根操作,共有  $2^3 = 8$  个解空间。每个解空间运行一千万次试验(共八千万次),在 i7-12700KF,32 GB 内存的台式机上运行,最终仅有表 5 所示的 4 个配置类型能产生有效的一阶配置。解空间的规模大小直接体现于找到的有效一阶配置数量<sup>[21]</sup>。而解空间规模越大,越能在后续厚透镜设计、色差校正时提供更大的优化自由

表 5 蒙特卡洛程序生成有效配置的数量

Tab. 5 Number of valid configurations with Monte Carlo

| First-order configuration type | Number of first-order configurations | Ray-trace-able count |
|--------------------------------|--------------------------------------|----------------------|
| PNPN(changeroot)               | 9 098                                | 149                  |
| PNPP                           | 5 494                                | 85                   |
| PNPP(changeroot)               | 299                                  | 8                    |
| PNPN                           | 26                                   | 0                    |

度。实验结果表明,即使是解空间最广阔的PNPN换根类型,可光线追迹的配置仅有十万分之一,这说明设计高性能变焦镜头十分具有挑战性。而可光线追迹的配置较少的类型也就意味着解空间的规模很小,如PNPN,不建议将该类型作为初始结构。

任务总计耗时 4 小时,最为耗时的步骤是将一阶配置导入 CODE V 软件进行建模、优化,并生成可用于光线追迹的镜头设计文件。对所有一阶配置进行优化与评估的过程中,F 数初始设置为 6,后逐渐减小至 4.5,像高从 1 mm 逐步扩大至 8.19 mm。透镜材料使用 Schott 公司的 BK7 玻璃,其在 555 nm 参考波长下的折射率为 1.518 274。各视场与变焦位置下的 RMS 光斑直径的 RSS 分布如图 5(a)所示,光斑 RSS 中位数最小的解空间是 PNPP 换根类型,最小的光斑 RSS 出现在 PNPP 解空间中,综合而言 PNPP 解空间的表现最好。值得注意的是,解空间的规模虽然重要,却不是唯一衡量一阶配置优劣的因素,例如 PNPN 换根的解空间虽然大,但并不一

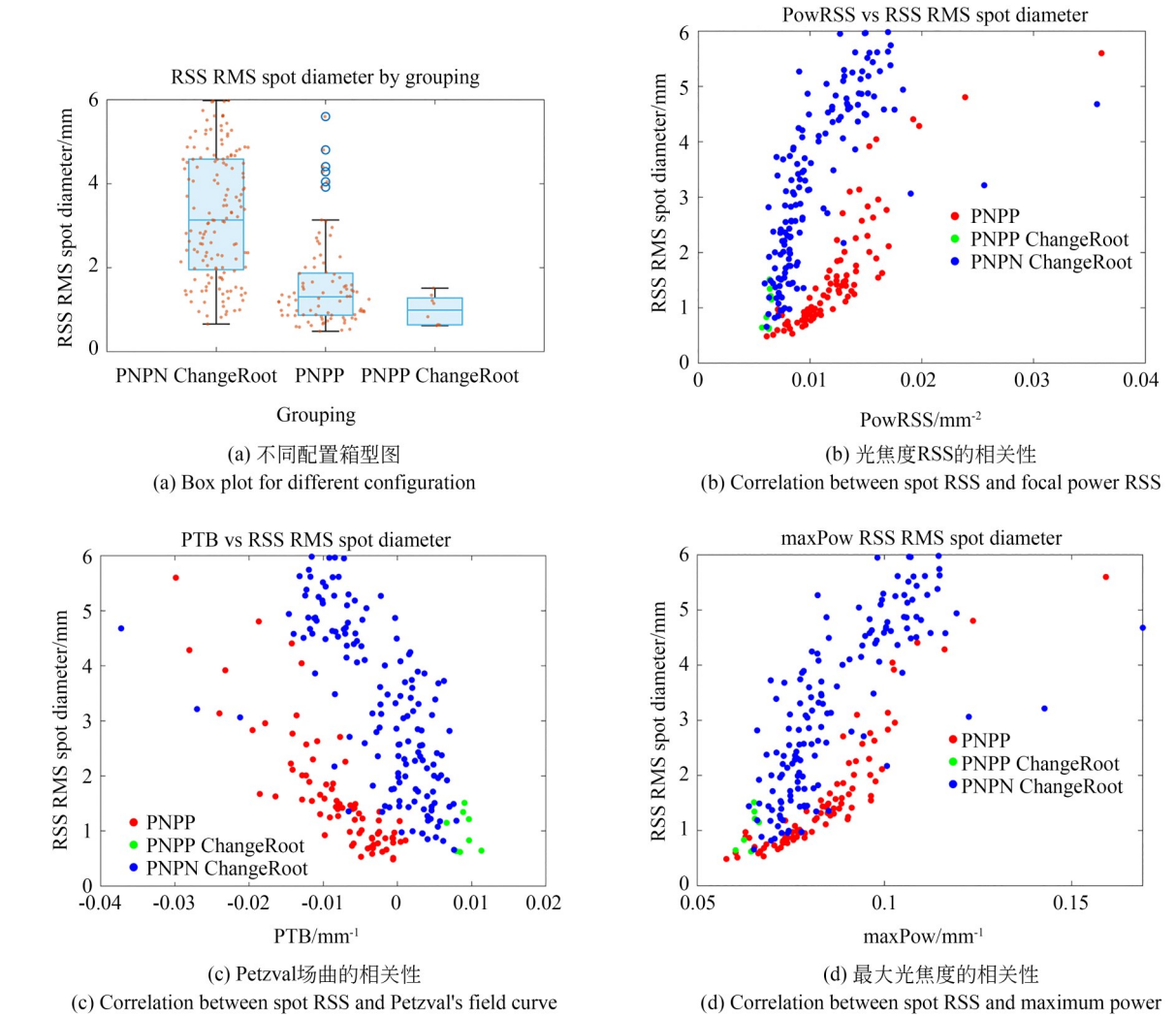


图 5 RMS 光斑直径的 RSS 的分布情况

Fig. 5 Distribution for RSS of the RMS spot diameter

定在成像性能上优于 PNPP。

光斑 RSS 与光焦度 RSS、Petzval 场曲、组份最大光焦度的相关性如图 5(b)~5(d)。图 5(b)显示,光斑 RSS 与光焦度 RSS 呈现显著的正相关关系。这一现象可归因于在系统总光焦度一定的条件下,各组份光焦度的 RSS 越大,表明光线在组份间传播路径越“曲折”,即折射角度越大。根据赛德尔像差公式:

球差  $S_I = -\sum A^2 \cdot h \cdot \Delta \left( \frac{u}{n} \right), \quad (26)$

慧差  $S_{II} = -\sum \bar{A} A \cdot h \cdot \Delta \left( \frac{u}{n} \right), \quad (27)$

像散  $S_{III} = -\sum \bar{A}^2 \cdot h \cdot \Delta \left( \frac{u}{n} \right), \quad (28)$

Petzval 场曲  $S_{IV} = -\sum H^2 \cdot c \cdot \Delta \left( \frac{1}{n} \right). \quad (29)$

(具体符号含义见表 6),光线入射角的增大将导致各类像差的显著上升。另一方面,由式(29)可知,组份光焦度总和与系统 Petzval 场曲成正比关系,因此可通过前者对后者进行近似表征。图 5(c)显示,光斑 RSS 与 Petzval 场曲之间的相关性较弱。尽管性能优良的结构往往其光焦度总和接近于零,但并非所有光焦度总和为零的配置都具备良好的像差性能。原因在于,具有较大光焦度的组份往往会导致光线产生大角度偏折,从而引起较严重的像差累积效应<sup>[4]</sup>。此外,图 5(d)显示光斑 RSS 与组份最大光焦度之间也具有较强的正相关性,进一步印证了高光焦度元件在整体像差表现中的主导影响。综上所述,光

表 6 赛德尔像差公式的符号含义

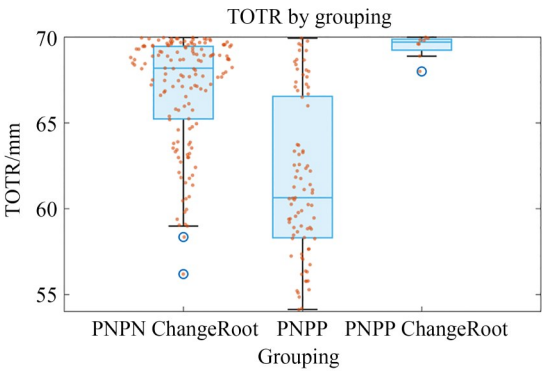
Tab. 6 Meanings of the symbols in Seidel sums

| Symbol    | Meaning                                    |
|-----------|--------------------------------------------|
| $A$       | Refraction invariant of the marginal ray   |
| $\bar{A}$ | Refraction invariant of the chief ray      |
| $h$       | Ray height                                 |
| $u$       | Angle between the ray and the optical axis |
| $n$       | Refractive index                           |
| $\Delta$  | Rear-surface quantity minus front-surface  |
| $H$       | Lagrange invariant                         |
| $c$       | Curvature                                  |

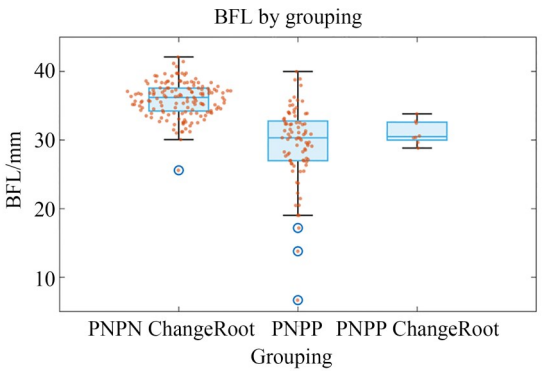
焦度 RSS 与组份光焦度的 RSS、组份最大光焦度都具有很强的相关性,这两个一阶参数可在一定程度上反映系统的性能。

本文也对可光线追迹配置的总长、后截距在解空间层面进行了评估,如图 6 所示。图 6(a)和(c)显示相比于其他两种配置,PNPP 配置的性能对于总长不敏感。值得注意的是,PNPP 换根极少的可光线追迹配置集中在 70 mm 总长边界附近,这说明总长的限制是制约解空间大小的重要因素。图 6(b)和(d)显示不同配置的后截距相差不大。

综上所述,虽然 PNPP 不换根解空间比 PNP 换根略小,但其具有出色的光斑 RSS 性能、机械尺寸优势。因此综合来看最具前景的解空间为 PNPP 不换根,后续设计将选用 PNPP 不换根的配置。



(a) 不同配置总长箱型图  
(a) Box plot for total track length with different configuration



(b) 不同配置后截距箱型图  
(b) Box plot for back focal length with different configuration

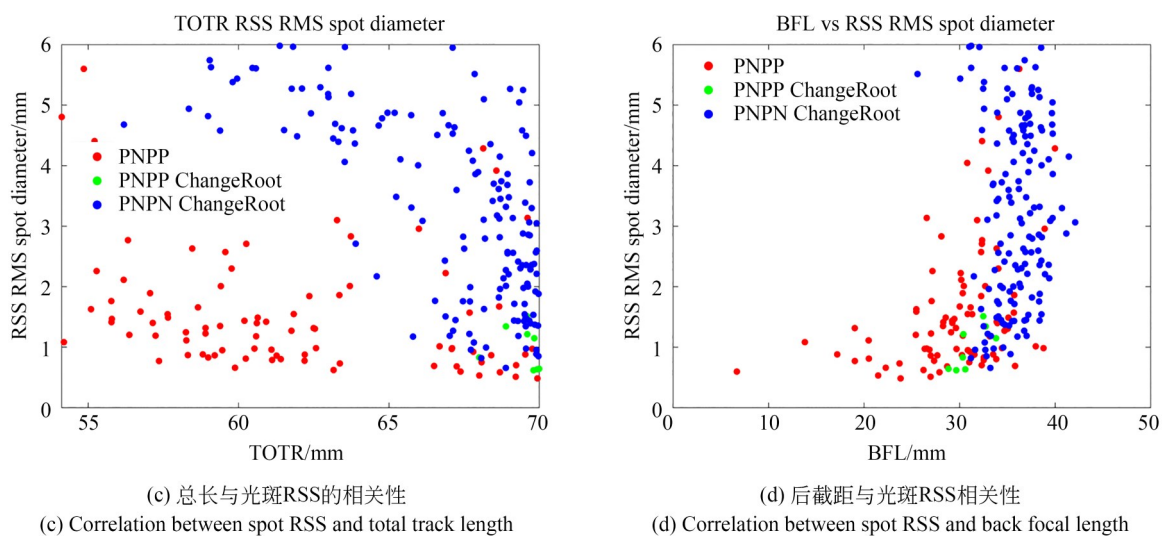


图 6 可光线追迹配置的总长和后截距分布

Fig. 6 Distribution for total track length and back focal length of ray traceable configurations

### 4.3 最终设计结果

最终的手机变焦镜头设计是基于 PNPP 不换根的配置,选择性能良好的一阶配置作为初始结构,其变焦运动曲线、单透镜 2D 图和参数见图 2(a)、图 4(a)、表 1 和表 2。在初始结构的基础上通过使用不同玻璃材料进行色差校正,以及增减、拆分、合并透镜等操作完成最终设计。

最终的系统包含 15 片透镜,其中有 4 个双胶合透镜,所有表面均为球面,运动组由一个双胶合、一到两个单透镜组成,如图 7 所示。该设计有  $F/2.9$  的恒定光圈,总长为 90 mm,后截距为 7.43 mm,满足表 3 中的所有系统规格要求。本文还对最终设计的变焦凸轮曲线做了评估:在 23.10~69.27 mm 焦距范围内均匀采样 200 个焦距,仅将移动组份的间隔作为变量,进行优化,凸轮曲线结果如图 8 所示。凸轮曲线平滑且与图 2(a)所示的一阶初始结构配置的运动曲线高度一致,并且每个采样焦距的像质基本一致。包括图 9 所示的部分 MTF 在内,系统所有焦段、所有视场在 80 lp/mm, 160 lp/mm 处的 MTF 均大于 0.45, 0.15。综上所述,该手机变焦镜头最终设计结果各项指标参数均符合手机镜头成像需求,且成像质量、变焦效果良好。

最终设计结果与所筛选的一阶配置初始方案在外观、变焦曲线方面很相似,而本文在正式设计与优化阶段并未对各组份的焦距、变焦运动

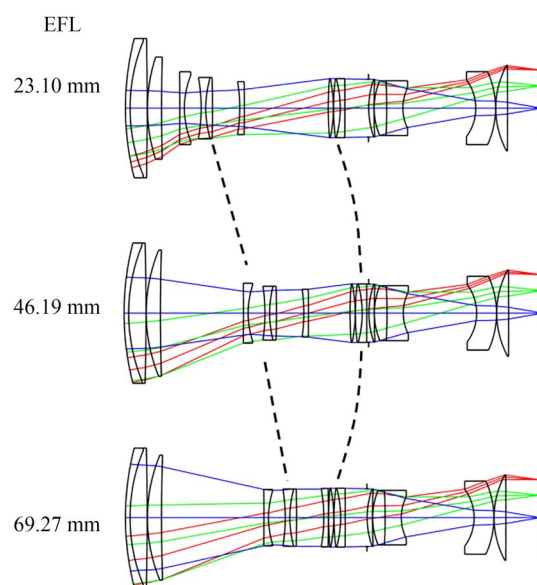


图 7 手机变焦镜头最终设计结果的 2D 图

Fig. 7 2D drawing of the final design result for the smart-phone zoom lenses

施加约束。这说明,本设计的成功在很大程度上归功于蒙特卡洛搜索对一阶配置初始结构不同解空间的识别与评估——在设计初期就限定总长、后截距等参数,并在该限定范围内生成初始结构。而在现有设计方法中,设计者不清楚所选结构的总长等参数能够压缩到何种程度,只能不断试错与调整,因此本文所提出的方法提高了设计效率。

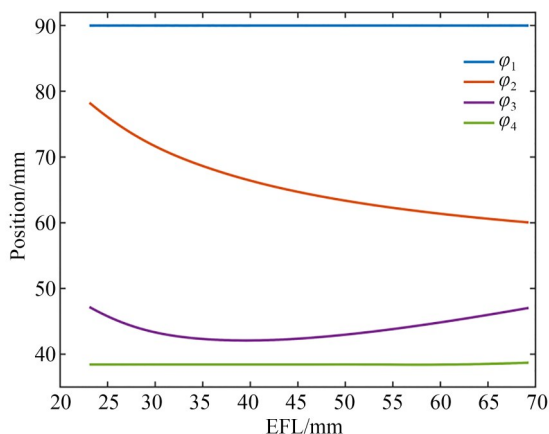


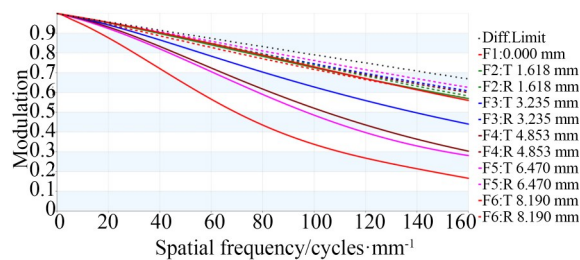
图8 手机变焦镜头最终设计结果的凸轮曲线

Fig.8 CAM curves of the final design result for the smartphone

## 5 结 论

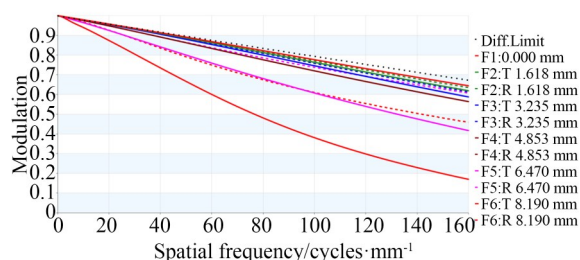
针对变焦镜头小型化的设计需求,本文提出了一种基于蒙特卡洛和真实光线追迹的手机变焦镜头设计方法。根据微分方程法筛选所生成的一阶配置后,使用真实光线追迹方法进一步优化与评估,基于所筛选的初始结构完成了F数恒定为2.9、等效焦距达61~183 mm、总长90 mm的紧凑型变焦镜头,相较于常规变焦镜头,在轻量化方面具备明显优势。其变焦曲线平滑,各视场、各焦距的MTF均优于0.45@80 lp/mm,0.15@160 lp/mm,畸变低于4%,相对照度高于20%。本文所提出的设计方法可以在设计流程开始前就确定最优的组焦距组合,全局性地评估所有解空间,从而简化了后期优化工作。同时也有助于探索新型光学结构,为紧凑型变焦镜头设计提供了新的解决思路。

然而,本文的研究仍存在一定的局限性。目前的分析仅限于正组机械补偿结构,即以移动组份具有固定NP光焦度作为前提进行设计。事实上,变焦系统的设计空间广泛且多样化,如由三个相邻运动组构成的结构,或双组联动式结构等,均值得后续进一步探索与研究。此外,在进行厚透镜实体化过程中,可尝试更多地引入三级



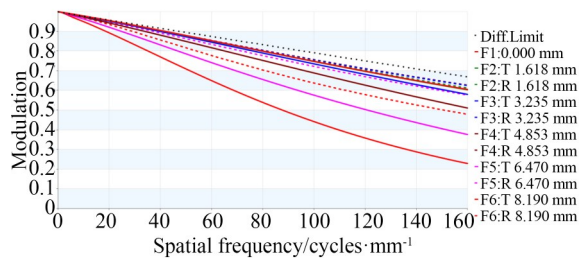
(a) 短焦(23.10 mm)

(a) Short focal length(23.10 mm)



(b) 中间焦距(46.19 mm)

(b) Medium focal length(46.19 mm)



(c) 长焦(69.27 mm)

(c) Long focal length(69.27 mm)

图9 手机变焦镜头最终设计结果部分焦段的MTF曲线  
Fig.9 MTF curves of the final design result for the smartphone zoom lenses

像差理论,以求解变焦系统各组份的初始结构<sup>[22]</sup>,从而增加适合光线追迹的解集数量。

### 作者贡献声明:

郭佳健:设计方法、算法的提出,数据处理与分析,论文构思和撰写;

谢元昊、牟帅威:光学系统的设计与优化;

张新、刘铭鑫、史广维、赵尚男:论文审核与编辑写作。

### 参考文献:

[1] NEIL I A. Evolution of zoom lens optical design

technology and manufacture [J]. *Optical Engineering*, 2021, 60(5): 051211.

- [2] 刘巧玲,陈丽娜,余华恩,等. 可变焦距机器视觉镜头光学系统设计[J]. 应用光学, 2015, 36(2): 199-205.  
LIU Q L, CHEN L N, YU H E, *et al.* Optical system design of zoom lens for machine vision systems [J]. *Journal of Applied Optics*, 2015, 36(2): 199-205. (in Chinese)
- [3] 邹刚毅. 基于自由曲面变形镜的反射变焦光学系统设计方法研究[D]. 西安: 中国科学院大学(中国科学院西安光学精密机械研究所), 2024.  
ZOU G Y. *Research on Design Method of Reflective Zoom Optical System based on Free-Form Deformable Mirror* [D]. Xi'an: Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2024. (in Chinese)
- [4] KINGSLAKE R, JOHNSON R B. *Lens Design Fundamentals, 2nd Edition* [M]. Amsterdam: Elsevier Science Bv, 2010.
- [5] SMITH W J. *Modern Optical Engineering: The Design of Optical Systems* [M]. 4th Edition ed. New York: McGraw-Hill Education, 2008.
- [6] GROSS H. *Handbook of Optical Systems, Volume 4: Survey of Optical Instruments* [M]. Weinheim: Wiley-Vch, 2005.
- [7] 许宁晏,高志山,陈露,等. 应用自由曲面的紧凑型长焦手机镜头设计(特邀)[J]. 红外与激光工程, 2023, 52(7): 71-80.  
XU N Y, GAO Z S, CHEN L, *et al.* Design of compact telephoto mobile phone lens based on free-form surface (invited)[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2023, 52(7): 71-80. (in Chinese)
- [8] CALDWELL J B, NEIL I A. *Wide-range, wide-angle compound zoom with simplified zooming structure*: US, 20060227415[P]. 2006-10-12.
- [9] 卢建龙,叶海水,牛亚军,等. 长焦镜头、摄像头模组及电子设备: 中国, 114966919A [P]. 2022-08-30.  
LU J L, YE H S, NIU Y J, *et al.* *Telephoto lenses, camera modules and electronics*: China, 114966919A[P]. 2022-08-30.
- [10] 董健,王春艳,孙昊,等. 腹腔镜用液体透镜变焦光学系统设计研究[J]. 中国激光, 2023, 50(21): 181-189.  
DONG J, WANG C Y, SUN H, *et al.* Design and study of liquid lens zoom optical system for laparoscopy[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2023, 50(21): 181-189. (in Chinese)
- [11] 刘海渤,胡源,李雨哲,等. 液体透镜研究现状与发展综述[J]. 激光与光电子学进展, 2024, 61(9): 66-76.  
LIU H B, HU Y, LI Y Z, *et al.* Review of current status and development of liquid lens[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2024, 61(9): 66-76. (in Chinese)
- [12] LIU Z Y, GAN Z H, ZHANG M, *et al.* Design of a small non-displacement zoom optical system based on Gaussian brackets and traversal ideation [J]. *Optics Communications*, 2024, 557: 130336.
- [13] DODOC A. Toward the global optimum in zoom lens design[C]. *Zoom Lenses IV. San Diego, California, USA*. SPIE, 2012: 848802.
- [14] NEIL I A. High-performance zoom lenses with a forward-located stop [C]. *Zoom Lenses IV. San Diego, California, USA*. SPIE, 2012.
- [15] NEIL I A. *Zoom lens with forward-located aperture stop*: US, 20130250160[P]. 2013-09-26.
- [16] 陶纯堪. 变焦距光学系统设计[M]. 北京: 国防工业出版社, 1988.  
TAO C K. *Design of Zoom Optical System* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1988. (in Chinese)
- [17] MIKS A, NOVAK J. Paraxial analysis of four-component zoom lens with fixed distance between focal points[J]. *Applied Optics*, 2012, 51(21): 5231-5235.
- [18] PAL S, HAZRA L N. Structural design of four-component optically compensated zoom lenses: Use of evolutionary programming [J]. *Optik*, 2012, 123(17): 1534-1541.
- [19] SUN W S, TIEN C L, LIU Y H. Optical design for the lens depth of a periscope-type  $3\times$  zoom lens with 8-megapixel mobile phone [J]. *Optical and Quantum Electronics*, 2020, 52(3): 141.
- [20] MIYAGAWA N, CHEN Y H. MIYAGAWA N, CHEN Y H. : US, 10823942 [P]. 2020-11-03.
- [21] LIPPMAN D H, TEVEROVSKY D S, BENTLEY J L. Monte Carlo first-order design method for anamorphic cinema zoom lenses [J]. *Optical Engineering*, 2021, 60(5): 051203.
- [22] 史光辉. 用高斯光学和三级像差理论求变焦距物

镜的初始解[J]. 中国光学, 2018, 11(6): 1047-1060.

SHI G H. Find preliminary solution of zoom objec-

tive lens using Gaussian optics and third-order aberration theory[J]. *Chinese Optics*, 2018, 11(6): 1047-1060. (in Chinese)

#### 作者简介:



郭佳健(2000—),男,黑龙江齐齐哈尔人,硕士研究生,2023年于中山大学获得学士学位,主要从事成像及照明光学系统设计方面的研究。E-mail: guojiajian23@mails.ucas.ac.cn

#### 通讯作者:



赵尚男(1993—),女,吉林长春人,博士,助理研究员,2015年和2018年于北京理工大学分别获得学士和硕士学位,2024年于中国科学院大学获得博士学位,主要从事成像光学系统优化设计等方面的研究。E-mail: 18810575846@163.com