

文章编号: 1002-1582(2026)04-0385-07

基于高阶非球面的大视场低畸变航拍镜头设计

任尚杰¹, 栗星¹, 王斌^{2*}, 董宁琛²

(1. 中国科学院西安光学精密机械研究所, 陕西 西安 710119)

(2. 中国兵器工业试验测试研究院, 陕西 西安 710116)

摘 要: 为满足无人机等高几何精度携行平台对超广角、低畸变成像的矛盾需求, 基于ZEMAX设计了一款高性能航拍镜头。镜头焦距为4mm, F 数为2.8, 对角线视场角高达113.6°。为克服大视场引起的几何畸变与像质退化, 设计采用了10片式非对称反望远结构, 并在核心校正位置应用了高阶双非球面技术, 实现了对轴外高级像差和畸变的精确解耦控制。结构上, 成功实现了约10mm的光学后焦距, 为传感器集成预留了充足空间。结果表明: 系统全视场畸变严格控制在小于0.8%, 最大场曲小于0.08mm, 且在奈奎斯特频率70lp/mm处, 全视场MTF均稳定高于0.5, 并具有良好的像面相对照度。此外, 公差分析验证了该设计在常规精密加工条件下具备良好的制造可行性。本设计成功解决了超广角下低畸变与长后焦的制约关系, 各项指标均衡, 能够满足高分辨率航拍与测量的使用要求。

关 键 词: 光学设计; 大视场; 可见光; 非球面

中图分类号: O438

文献标识码: A

Design of large field-of-view low-distortion aerial lens based on high-order aspheres

REN Shangjie¹, LI Xing¹, WANG Bin^{2*}, DONG Ningchen²

(1. Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Xi'an 710119, China)

(2. Norinco Group Test and Measuring Academy, Xi'an 710116, China)

Abstract: To meet the conflicting requirements of ultra-wide-angle coverage and low-distortion imaging for high-precision portable platforms such as Unmanned Aerial Vehicles (UAVs), a high-performance aerial lens is designed using ZEMAX software. The proposed lens features a focal length of 4 mm, an F -number of 2.8, and a diagonal field of view (FOV) of 113.6°. To overcome the geometric distortion and image quality degradation typically associated with large FOVs, the design adopts a 10-element asymmetric retrofocus structure. Furthermore, high-order double-sided aspheric surfaces are introduced at core correction positions to precisely decouple and suppress off-axis high-order aberrations and distortion. Structurally, an optical back focal length (BFL) of approximately 10 mm is achieved, providing sufficient space for sensor integration. The design results indicate that the optical distortion across the entire field is strictly controlled within 0.8%, and the maximum field curvature is less than 0.08 mm. At the Nyquist frequency of 70 lp/mm, the Modulation Transfer Function (MTF) remains consistently above 0.5 for the full field of view, and the system exhibits good relative illumination across the image plane. In addition, tolerance analysis verifies that the design possesses good manufacturing feasibility under conventional precision machining conditions. This design successfully resolves the constraints between ultra-wide angle, low distortion, and long back focal length, delivering balanced performance that meets the rigorous requirements for high-resolution aerial photography and measurement.

Keywords: optical design; large field of view; visible spectrum; aspherical surface

收稿日期: 2026-02-04; 收到修改稿日期: 2026-04-13

基金项目: 稳定支持项目 (wdzc-2-06); 陕西省重点研发项目 (2021GY-342); 陕西省青年基金C类

作者简介: 任尚杰 (1989—), 男, 高级工程师, 从事光电子学研究。rsj@opt.ac.cn

王斌 (1985—), 男, 高级工程师, 从事光学成像、测控技术等研究。

* 通讯作者: 343966539@qq.com

0 引 言

随着无人机、飞艇等携行平台在遥感探测、安防巡检及环境监测中的广泛应用,其对搭载的光学成像系统提出了远超传统平台的更严苛要求:不仅要求镜头具备大视场(Field of View, FOV)以捕捉广阔场景,还需严格控制光学畸变,确保图像信息的几何精度^[1, 2],同时满足轻量化、小型化与高环境适应性的工程约束^[3]。在这一背景下,大视场与低畸变已成为衡量携行式光学系统性能的核心指标。然而,在传统光学设计中,大视场往往伴随着显著的畸变,特别是在像面边缘区域,桶形或枕形畸变会严重破坏图像的几何保真度^[4],直接影响后续测绘、定位与识别等任务的精度。因此,解决大视场与低畸变之间的固有矛盾,并使其适配于飞行平台的严酷工况,成为当前光学设计领域的一项关键挑战^[5]。

大视场光学系统中的畸变,主要源于透镜曲面形状、材料折射特性、光路传播的非线性效应以及镜片组排布方式。在众多技术路径中,采用非球面透镜已成为校正大视场像差的有效手段之一^[6, 7]。相较于传统球面透镜,非球面透镜通过其更为复杂的曲面设计,能够更精准地修正球差、场曲等多种轴外像差^[8],从而显著提升边缘视场的成像质量和几何保真度^[9]。此外,低色散等新型光学材料的应用,进一步减少了色差对成像的影响;而先进光学仿真软件的持续发展,则为实现多参数、系统级的像差控制与优化提供了关键支撑^[10]。

目前,已有研究广泛验证了非球面技术是提升大视场镜头性能方面的有效手段。例如,侯国柱等^[10]基于ZEMAX设计了超广角物镜,通过优化非球面实现了良好的成像质量。张潇等^[11]探究了非球面在鱼镜头中的优化设计,有效校正了像差。高冰冰等^[12]则进一步研究了应用多个非球面优化鱼镜头的方法。在国际上,Gurtner等^[13]针对无人机应用设计了一款紧凑型高分辨率广角镜头。Zhang等^[14]同样面向航空摄影,设计了一款低畸变、高相对照度的广角镜头。刘锦琳和余飞鸿^[8]对非球面表述及其特点进行了深入分析,阐明了其在像差校正中的灵活性。这些研究成果均表明,非球面技术^[7, 15]在大视场低畸变光学系统中具有重要的应用价值和发展潜力。

针对携行平台的实际应用需求,本文旨在提出一种融合非球面的大视场低畸变镜头设计方案。该方案不仅能在可见光波段内实现超宽视场与低畸变成像,还将兼顾系统的紧凑性、小型化以及

环境适应性,力求为无人机、飞艇等飞行平台打造一款高性能、高可靠性的光学成像解决方案,并为相关领域的技术进步提供有价值的参考。

1 指标论证分析

1.1 设计要求

为了实现适用于无人机等空中平台的大视场广角镜头,设计要求镜头的对角线视场角需达到或超过 110° ,覆盖整个可见光波段,并兼容分辨率不低于 1920×1080 的探测器。镜头的畸变应严格控制在 2% 以内,以确保成像清晰、细节丰富。此外,镜头设计应兼顾紧凑性与轻便性,以满足空中平台对体积、重量及性能的综合要求。具体的光学镜头设计指标详见下表(表1)。

表1 总体技术指标要求

参数	数值
工作波段/nm	400~700
视场(对角线)/($^\circ$)	≥ 110
像素数	$\geq 1920 \times 1080$
分辨率	$\leq 0.1\text{m}@50\text{m}$
F 数	2.8
MTF曲线	$\geq 0.3@30\text{lp/mm}$
畸变/%	≤ 2
光学长度/mm	≤ 70

1.2 指标参数计算

根据设计需求,选用了国产长光辰芯某型号的 1920×1080 分辨率可见光探测器,其像元大小为 $5.5\mu\text{m}$,工作响应波段为 λ (400~700nm)。在下文中,将对各项参数进行详细分析和论证。

1.2.1 成像焦距 F

焦平面探测器有效区域为矩形,像元数为 1920×1080 , D_{sensor} 为探测器对角线尺寸,光学系统的对角线视场角由下式计算决定

$$FOV_{\text{diagonal}} = 2 \times \arctan\left(\frac{D_{\text{sensor}}}{2F}\right) \quad (1)$$

$$2\omega_1 = 2 \times \arctan\left(\frac{1920 \times d}{2F}\right) \quad (2)$$

$$2\omega_2 = 2 \times \arctan\left(\frac{1080 \times d}{2F}\right) \quad (3)$$

式中 ω_1 、 ω_2 为半视场角; $d = 5.5\mu\text{m}$ 。由设计参数可知,当系统对角线视场角为 110° 时,焦距 F 等于 4.24mm 。水平和垂直视场由式(2)和(3)决定,则有 $2\omega_1 = 102.4^\circ$, $2\omega_2 = 70^\circ$ 。因此,在至少满足系统对角线视场 110° 的条件下,系统的成像焦距 F 需要满足小于或等于 4.24mm ,考虑设计余量,焦距 F 取 4mm 。

1.2.2 空间分辨率

光学系统的观测距离分辨率表示为

$$R_w = \frac{d \times L}{F} \quad (4)$$

式中, L 表示观测距离; R_w 表示观测距离处的分辨率。根据已知参数, 代入上述公式计算得出: 在观测距离为 50 米时, 可分辨尺寸 R_w 约为 0.069m, 小于 0.1m, 因此符合表 1 中的设计要求。

1.2.3 通光口径和 F 数

在选择通光口径和 F 数时, 需兼顾光学设计的可实现性与系统性能需求。本设计选定 F 数为 2.8, 光学镜头的通光口径表示为

$$F = \frac{f}{D} \quad (5)$$

式中, D 代表光学系统的入瞳直径。通过计算可知, 当焦距为 4mm 时, D 的取值为 1.4mm。

2 光学设计

本镜头的设计目标是研制一款高性能、大视场且低畸变的高清成像镜头。经过深入论证与分析, 系统的主要技术指标被明确为: 有效焦距 (EFL) 约为 4mm, 光圈值 (F -number) 为 $F/2.8$, 对角线最大视场角 (FOV) 超过 110° 。为同时满足超广角、大光圈和高成像质量这三项相互制约的严苛要求, 设计过程中必须采用先进的光学结构设计和精准的像差校正策略。

2.1 总体结构设计

对于视场角超过 110° 的大视场镜头, 设计通常采用反望远结构 (Retrofocus) 作为起点。该结构以前负后正的总体屈光力分布为基本特征, 通过前后镜组的协同配合, 在实现短焦距的同时保证了足够长的后焦距, 为传感器集成提供了便利。本设计最终采用的 10 片式光学系统即为经典的反望远结构, 其光路布局如图 1 所示。

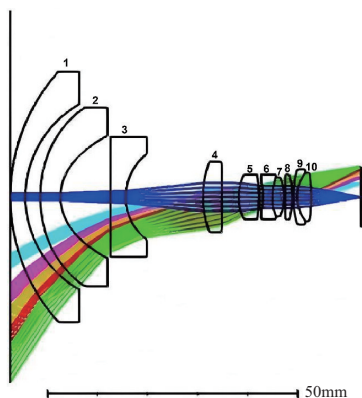


图 1 最终光学系统光路布局图

(图中数字 1~10 分别对应正文中的透镜 L1~L10)

系统的光阑 (Stop) 位于第五片透镜 (L5) 和第六片透镜 (L6) 之间, 呈中置布局。根据光阑位置, 系统可分为前、后两个镜组, 其详细功能拆解如下:

(1) 前镜组 (Front Group)

前组位于光阑之前, 由 5 片透镜构成, 总体呈现负光焦度。首片透镜 (L1) 为正弯月透镜, 用于接收大视场光线并初步引导主光线走向。第二片透镜 (L2) 是一片关键的强负弯月透镜, 其前后表面均采用了双非球面设计。它承担了核心的视场压缩功能, 将宽角度入射光线的主光线角有效“压平”, 并同步校正大视场带来的畸变与场曲。后续三片 (L3~L5) 为正透镜组, 负责进一步收敛光束, 控制孔径形态, 为光阑面预备合适的光束结构。该镜组设计在实现广角光路控制的同时, 完成了系统的初级像差校正。

(2) 后镜组 (Rear Group)

后组位于光阑之后, 由 5 片透镜组成三个子镜组, 整体呈现正光焦度, 承担主汇聚与精细像差平衡任务。首个子组 (L6, L7) 为胶合双透镜, 利用不同玻璃的色散特性, 重点校正轴向色差与倍率色差。

中间子组 (L8) 是一片独立负透镜, 通过引入负光焦度来平衡佩兹瓦场曲 (Petzval sum), 有效压制了像面弯曲。末尾子组 (L9, L10) 为第二片胶合透镜, 提供系统所需的主要正光焦度, 并进一步优化彗差与像散。这一后组设计在实现光束聚焦的同时, 完成了全系统的精细像差平衡。

2.2 像差校正策略

对于一款配备 $F/2.8$ 大光圈和大于 110° 大视场光学镜头, 其像差校正任务非常艰巨, 尤其是球差、彗差、色差、场曲和畸变等像差问题尤为突出。为了实现高水平的成像质量, 本设计采用了一种包含 10 片玻璃元件的复杂多镜组结构, 并引入了非球面技术, 以对各类型像差进行精细的平衡校正。

2.2.1 球差与彗差校正

在 $F/2.8$ 大光圈条件下, 与孔径相关的轴上像差 (球差) 及轴外像差 (彗差) 成为影响成像质量的关键因素。传统的球面系统为抑制此类像差, 通常需要借助多片透镜来分散光焦度, 这导致结构复杂。本设计采用了一种高效的像差控制策略: 在第二片透镜 (L2) 的两个光学表面上均引入偶次非球面。

偶次非球面 (Even Aspheric Surface, EAS) 的矢高 z 由下式定义, 其在球面基准上叠加高次修正项

$$z(r) = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2r^2}} + \alpha_1 r^2 + \alpha_2 r^4 + \alpha_3 r^6 + \dots \quad (6)$$

式中, c 为曲率 (半径 R 的倒数); k 为圆锥系数; r 为径向坐标; α_i 为非球面系数, 分别对应 r^i 为偶次非球面设计中的高次项系数, 共同用于精确描述非球面相对于基准球面的偏离。

ZEMAX 优化结果表明, L2 的非球面在 $r^4 \sim r^{10}$ 等关键高次项上均设置了显著的非零系数。这些高次项使光学设计能在不同径向高度上独立调控局部曲率, 系统性地调整光线路径, 使边缘光线与近轴光线精确交汇于同一焦点, 从而高效校正球差。此外, 非球面所引入的额外设计自由度, 也为抑制彗差提供了有效手段。

2.2.2 场曲、像散、畸变及色差校正

对于大视场光学系统, 视场相关像差 (尤其是场曲与畸变) 的校正尤为关键。

(1) 场曲与像散的校正

镜头的场曲特性主要由佩兹瓦和 (Petzval Sum) P 决定, 表示为

$$P = \sum_i \frac{\phi_i}{n_i} = \sum_i \frac{c_i - c_{i-1}}{n_i} \quad (7)$$

式中 n 代表折射率; Φ 表示光焦度。本设计采用的反望远结构 (负前组与正后组组合) 本身容易引入负的佩兹瓦和, 导致像面呈现内凹形态。为了实现平场成像目标, 设计中引入了多片高折射率玻璃材料, 例如折射率 $n_d > 1.8$ 的 H-ZLAF89L, 以及 $n_d > 1.7$ 的 D-LAF50-25、H-ZF12 和 H-ZLAF76。这些高折射率材料在提供所需光焦度的同时, 能有效降低对系统总佩兹瓦和的贡献, 使其趋近于零。经最终软件计算, 本光学系统的总佩兹瓦和数值优化至 -0.023 mm^{-1} , 可说明该设计结果在抑制场曲与像散、实现平场成像方面的有效性。

(2) 畸变控制

广角镜头 (特别是反望远型结构) 天然存在明显的桶形畸变。本设计通过以下两种策略协同进行控制:

1) 利用结构特性: 反望远结构本身具备一定的视场扩展与畸变自校正功能。

2) 优化光阑位置: 将光阑策略性地布置于系统光路的中部位置 (L5 与 L6 之间), 形成一种准对称光路布局。依据光学对称性原理, 该设计可有效补偿彗差、倍率色差与畸变等垂轴像差, 从而实现对图像变形的精准控制。

(3) 色差校正

色差校正是确保覆盖可见光波段成像系统成

像质量的关键环节。本设计针对 F 线 (486.1nm)、 d 线 (587. nm) 和 C 线 (656.3nm) 这三个特征波长进行优化, 以实现有效的可见光消色差。系统考虑选用成都光明 (CDGM) 玻璃库的镜片, 通过合理搭配具有不同阿贝数与折射率特性的镜片, 在全视场范围内达到了优异的色差平衡。

消色差设计基于不同阿贝数玻璃材料的组合使用。其核心原理在于利用不同材料色散特性的差异, 使系统对特定波长的色散相互抵消。对于紧密贴合的双胶合透镜, 其消色差条件通常设定为使蓝光 (F 线) 与红光 (C 线) 的焦距相等, 此时人眼敏感的黄光 (d 线) 像点也将处于最佳位置。

$$\sum \frac{\phi_i}{V_{di}} = \frac{\phi_1}{V_{d1}} + \frac{\phi_2}{V_{d2}} = 0, \phi = \phi_1 + \phi_2 \quad (8)$$

本设计采用的玻璃材料可分为两类特性互补的类型:

1) “火石”类玻璃具有高折射率、高色散 (低阿贝数) 特性 (H-ZF12、H-ZLAF89L)。

2) “冕牌”类玻璃具有低折射率、低色散 (高阿贝数) 特性 (H-K9L、H-ZPK7)。

通过将此类光学特性相反的玻璃组合成胶合组 (如 L6, L7 及 L9, L10) 或分离透镜, 系统在保持总光焦度的同时, 有效平衡了不同波长的光程差, 从而同步校正了轴向色差和倍率色差。具体而言, 经优化计算, 胶合镜组 L6, L7 在 F 线 (486.1nm) 和 C 线 (656.3nm) 下的等效焦距分别为 -15.072 mm 和 -15.924 mm , 两者差值为 0.852 mm 。而承担主要汇聚任务的胶合镜组 L9, L10 在 F 线和 C 线下的等效焦距分别为 51.681 mm 和 49.805 mm , 差值为 1.876 mm 。这两个胶合组呈现出的特定焦距差, 正是通过高低色散玻璃组合 (如 H-ZLAF89L 与 H-K9L) 构建的色散补偿量, 这种局部色散差值的设计, 能够在全局光路中协同中和前镜组引入的严重色差。

初步结构设计完成后, 设计进入软件自动优化阶段。构建了一个复杂的多重结构评价函数 (Merit Function), 以均方根 (RMS) 光斑半径、波前差、畸变和色差作为优化目标, 并对全部 6 个半视场 (0° 至 56.8°) 和 3 个主要波长进行加权处理。

在优化中, 将关键镜片的曲率半径、厚度、空气间隙以及 L2 的非球面系数设为变量, 采用阻尼最小二乘法进行多次迭代。最终, 系统成功收敛至最终结构, 各项像差均实现了良好平衡。

3 结果分析

3.1 成像质量分析

根据上述设计流程，最终确定的光学系统结构参数详见表 2，L2 的非球面（第 4 面和第 5 面）高阶系数则如表 3 所示。

表 2 镜头光学系统结构参数

镜面序号	曲率半径/mm	厚度/mm	玻璃材料	半口径/mm
1(物面)	Infinity	0.000		37.160
2	37.200	3.000	H-TK9	25.000
3	21.220	3.000		18.500
4(非球面)	26.240	4.000	D-LAF50-25	17.800
5(非球面)	9.940	10.035		12.200
6	Infinity	3.000	H-ZPK7	12.000
7	10.740	15.431		8.500
8	19.400	3.800	H-ZF12	7.000
9	-390.000	3.346		7.000
10	9.880	4.000	H-BAK4	4.500
11	-31.500	0.200		4.500
12(光阑面)	Infinity	0.690		2.289
13	-10.660	1.800	H-ZLAF89L	2.800
14	10.000	2.400	H-K9L	3.900
15	-9.200	0.200		3.900
16	Infinity	1.400	H-LAK8B	4.500
17	-17.300	0.200		4.500
18	18.270	0.800	H-ZLAF76	5.500
19	7.750	2.800	H-K9L	4.800
20	-32.400	9.900		4.800
像面	Infinity			6.075

为评估系统的最终成像性能，本文对系统的调制传递函数（MTF）、场曲、畸变、色差校正及点列图进行了详细分析。MTF 是评价镜头解析能力的关键指标。如图 2 所示，本系统在奈奎斯特频率（Nyquist frequency）70lp/mm 处，全视场的 MTF 值均高于 0.5。其中，中心视场（0.00°）的 MTF 值接近衍射极限，边缘视场（如 56.80°）的 MTF 值也保持在 0.3 以上。结果表明，该镜头在整个视场范围内均具有出色的对比度和细节分辨能力，满足高分辨率成像需求。

场曲和畸变是影响大视场镜头成像几何精度的关键因素。如图 3 所示，系统在全视场范围内的最大场曲小于 0.08mm，表明系统具有优秀平场特性，在整个像面上均能获得清晰的图像。同时，系统的畸变曲线（图 3 右侧）显示，在最大视场

56.8°处，畸变被严格控制在 0.8% 以内，远低于要求的设计指标。这证实了本设计在实现大视场的同时，成功抑制了桶形畸变，保证了图像的几何保真度。

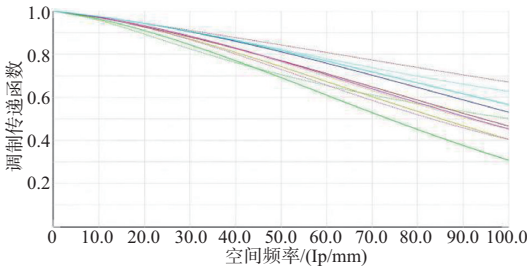


图 2 系统 MTF 曲线图

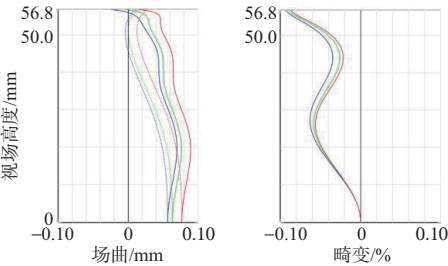


图 3 系统场曲与畸变曲线图

点列图（Spot Diagram）可直观地反映光线在像面上的汇聚情况。如图 4 所示，系统在中心视场的均方根（RMS）半径为 2.060μm，接近衍射极限。在 34.23°视场，RMS 半径小于艾里斑半径。随着视场增大，弥散斑逐渐增大，在最大视场 56.80°处 RMS 半径为 4.642μm。尽管边缘视场未达到衍射极限，但其能量高度集中，结合 MTF 分析（全视场@70lp/mm>0.5），表明系统对球差、彗差和像散等关键像差的校正依然良好，成像锐利度满足设计要求。

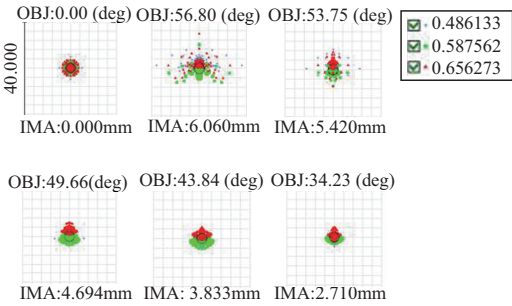


图 4 系统成像点列图

为进一步直观评估系统在全局层面的色差补偿效果，图 5 给出了该系统在可见光波段（0.486μm~0.656μm）下的垂轴色差曲线。由图 5 可见，通过

表 3 非球面系数

镜面序号	圆锥系数/mm	$r^2(\alpha_1)$	$r^4(\alpha_2)$	$r^6(\alpha_3)$	$r^8(\alpha_4)$	$r^{10}(\alpha_5)$
4(非球面)	1.003674	0	1.412964×10^{-5}	-3.554071×10^{-8}	$-7.159548 \times 10^{-11}$	3.471844×10^{-13}
5(非球面)	-0.398572	0	9.992456×10^{-6}	-3.341808×10^{-7}	7.373403×10^{-10}	1.042540×10^{-12}

胶合镜组 (L6, L7 与 L9, L10) 的全局补偿, 系统垂轴色差得到显著抑制。全视场最大色差仅 $3.5\mu\text{m}$, 且在 56.8° 边缘视场处进一步收敛至 $1.2\mu\text{m}$, 严格控制在艾里斑以内。结果表明, 系统在 113.6° 超大视场下成功实现了高阶倍率色差的平衡。

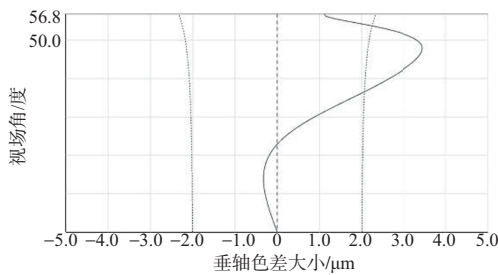


图 5 垂轴色差曲线

此外, 对于大视场航拍应用而言, 像面照度的均匀性 (相对照度) 是保证图像不出现严重暗角、确保边缘细节信息不丢失的重要指标。一般而言, 超广角镜头会受制于余弦四次方 ($\cos^4\theta$) 定律而导致边缘变暗。本文设计的非对称反望远结构通过合理的光阑位置排布与光线控制, 利用轴外视场的光瞳像差有效增大了边缘视场的入瞳面积, 从而一定程度补偿了照度衰减。如图 6 的系统相对照度曲线所示, 本系统在中心视场至边缘视场过渡平滑, 在最大半视场 (56.8°) 处的相对照度达到 77%。该结果表明系统具有足够且均匀的像面照度, 可以满足航空摄影的应用需求。

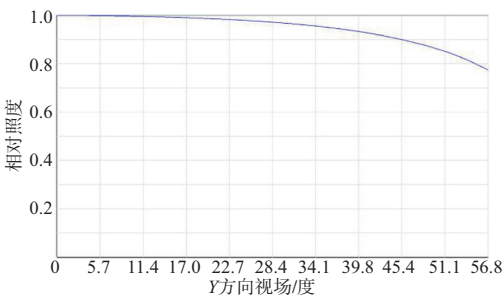


图 6 系统相对照度曲线图

3.2 公差分析

为进一步验证该光学设计的工程可实现性, 尤其是评估 L2 上的高阶双非球面在实际制造和装

配过程中对误差的敏感度, 本文进行了对应的公差分析。结合当前常规精密光学加工和装配水平, 为系统分配了如表 4 所示的公差范围。在此基础上, 以 70lp/mm 处的调制传递函数 (MTF) 作为评价指标, 利用软件进行了 1000 次蒙特卡洛 (Monte Carlo) 概率分析, 并引入后焦补偿。

表 4 镜头公差分配表

公差项目	分配数值
中心厚度/mm	± 0.05
元件偏心 X/mm	± 0.03
元件偏心 Y/mm	± 0.03
元件倾斜 X/ $^\circ$	± 0.05
元件倾斜 Y/ $^\circ$	± 0.05
折射率	± 0.001
阿贝数/%	± 0.8

蒙特卡洛分析结果显示, 在综合考虑所有设定的加工和装配误差后, 系统具有良好的良率表现。在 70lp/mm 空间频率下, 有 90% 的样本其全视场平均 MTF 值可保持在 0.42 以上, 80% 的样本 MTF 值在 0.45 以上。此外, 灵敏度分析 (Sensitivity Analysis) 表明, 系统性能衰减的主要来源实为后方镜组的空气间隔与偏心误差, 而高阶双非球面 (L2) 并未出现在最敏感项前列, 这说明本设计通过合理的全局分配成功压低了高阶非球面的公差敏感度。虽然相较于标称设计, 引入公差后性能存在一定程度的衰减, 但该结果仍远高于探测器的基本对比度阈值, 能够充分保障实际应用中的成像解析力。

3.3 性能对比与分析

为了更直观地体现本文提出的大视场低畸变镜头的综合性能优势, 将本设计与市面上具有相似焦段及视场参数的典型商业镜头进行了对比, 对比结果如表 5 所示。

由表 5 可知, 现有主流商业镜头 (如 Kowa、Computar 等) 虽能实现极低畸变, 但视场角普遍在 100° 以内。以同为 $2/3$ 英寸靶面的 Computar 镜头为例, 其畸变虽小于 0.1%, 但视场角为 94.6° , 且系统总长达 81.5mm 。相比之下, 本设计在实现

表 5 本设计与商业镜头设计参数对比

镜头	焦距/mm	F 数	视场角 FOV/ $^\circ$	最大畸变/%	系统总长/mm	靶面尺寸/"
本设计	4	2.8	113.6	< 0.8	70	2/3
LM5JCM(Kowa) ^[16]	5	2.8	95.3	< 0.5	56	2/3
WP-2M0420-C(Work Power) ^[17]	4	2.0	97.2	< 0.5	61.13	1/1.8
M0528-MPW3(Computar) ^[18]	5	2.8	94.6	< 0.1	81.5	2/3
VM0624MP10(ZLKC) ^[19]	6	2.4	68.1	< 1.25	54.5	2/3
MVL-HF0628M-6MPE(Hikvision) ^[20]	6	2.8	73.49	< 0.2	59	1/1.8
FL-CC0418DX-VG(Ricoh) ^[21]	4.8	1.8	96.4	—	53	2/3

113.6°大视场的同时,将畸变控制在0.8%以内,视场覆盖范围优于同类商业产品。此外,70mm的系统总长也满足了航空挂载的紧凑性需求。对比结果表明,本系统在兼顾大视场与低畸变的同时,展现出综合成像性能上的优势。

4 结 论

本文基于ZEMAX软件设计了一款焦距为4.0mm、光圈 $F/2.8$ 、视场角高达113.6°的大视场镜头。该系统采用了多元化的像差平衡策略:在结构上,选用了由10片透镜组成的反望远架构,有效解决了短焦距与长后焦距之间的矛盾,为传感器组件预留了充足的空间;在像差校正方面,在第二片透镜上应用了高阶双非球面技术,显著改善了大光圈球差、彗差以及广角场曲和像散的校正效果;在色差与照度控制上,通过光阑后置布局与高低色散玻璃的组合,实现了宽波段色差平衡,并有效补偿了超广角镜头的边缘照度衰减,保证了全视场的照度均匀性。此外,蒙特卡洛公差分析结果证明,该系统在常规精密加工与装配条件下展现出良好的良率与量产可行性。

综上所述,本设计通过非球面技术与反望远结构的有机结合,在大视场与低畸变的严苛条件下实现了各项像差的高度平衡。与同类设计相比,本系统在实现超大视场覆盖的同时,成功将畸变严格控制在0.8%以内。设计结果表明,该镜头系统能够为现代高分辨率、高保真度的航拍及无人机测量应用提供一种切实可行的光学解决方案。

参考文献:

- [1] Sun W S, Tien C L, Chen Y H, et al. Ultra-wide angle lens design with relative illumination analysis[J]. Journal of the European Optical Society-Rapid Publications, 2016, 11: 16001.
- [2] Zhuang Z, Parent J, Roulet P, et al. Freeform wide-angle camera lens enabling mitigable distortion[J]. Applied Optics, 2022, 61(18): 5449—5456.
- [3] Yang Q. Design study of a compact ultra-wide-angle high-spatial-resolution high-spectral-resolution snapshot imaging spectrometer[J]. Optics Express, 2021, 29(2): 2893—2908.
- [4] Sahin F E, Tanguay A R Jr. Distortion optimization for wide-angle computational cameras[J]. Optics Express, 2018, 26(5): 5478—5487.
- [5] Li C J, Ling H. Wide-angle, ultra-wideband ISAR imaging of vehicles and drones[J]. Sensors, 2018, 18(10): 3311.
- [6] 钱楷, 刘长进, 张天安, 等. 超大光圈广角日夜共焦监控镜头设计[J]. 武汉大学学报(理学版), 2022, 68(5): 567—573.
Qian Kai, Liu Changjin, Zhang Tianan, et al. Design of large-aperture wide-angle day and night confocal monitoring lens[J]. Journal of Wuhan University (Science Edition), 2022, 68(5): 567—573.
- [7] Hu X, Wang X, Liu S, et al. Research on long-distance, wide field-of-view and large depth-of-field terahertz imaging based on aspheric lens[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2023, 161: 107381.
- [8] 刘锦琳, 余飞鸿. 旋转对称非球面表述及其特点分析[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(9): 335—348.
Liu Jinlin, Yu Feihong. Rotationally symmetric aspheric surface representation and its characteristics analysis[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(9): 335—348.
- [9] 张学军. 空间光学系统先进制造技术进展——从非球面到自由曲面[J]. 光学学报, 2023, 43(8): 0822001.
Zhang Xuejun. Advances in advanced manufacturing technology for space optical systems: from aspheric to freeform surfaces[J]. Acta Optica Sinica, 2023, 43(8): 0822001.
- [10] 侯国柱, 吕丽军. 基于ZEMAX的超广角照相物镜设计[J]. 应用光学, 2016, 37(3): 441—445.
Hou Guozhu, Lv Lijun. Design of ultra-wide-angle photographic objective based on ZEMAX[J]. Journal of Applied Optics, 2016, 37(3): 441—445.
- [11] 张潇, 吕丽军. 鱼眼镜头光学系统的非球面优化设计[J]. 应用光学, 2019, 40(5): 863—870.
Zhang Xiao, Lv Lijun. Aspheric optimization design of fisheye lens optical system[J]. Journal of Applied Optics, 2019, 40(5): 863—870.
- [12] 高冰冰, 吕丽军, 曾涛. 应用多个非球面优化鱼眼镜头的方法[J]. 光学仪器, 2022, 44(3): 44—55.
Gao Bingbing, Lv Lijun, Zeng T. Method for optimizing fish-eye lens using multiple aspheric surfaces[J]. Optical Instruments, 2022, 44(3): 44—55.
- [13] Gurtner A, Greer D G, Glasscock R, et al. Investigation of fish-eye lenses for small-UAV aerial photography[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2009, 47(3): 709—721.
- [14] 张继艳, 黄元庆, 熊飞兵, 等. 短焦距超广角镜头的光学设计[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(10): 102302.
Zhang Jiyan, Huang Yuanqing, Xiong Feibing, et al. Optical design of short focal length ultra-wide-angle lens[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(10): 102302.
- [15] 林正, 徐苗, 余华恩, 等. 广角微型投影镜头设计[J]. 光学仪器, 2017, 39(4): 49—53.
Lin Zheng, Xu Miao, Yu Huaen, et al. Design of wide-angle micro-projection lens[J]. Optical Instruments, 2017, 39(4): 49—53.
- [16] Kowa. LM5JCM Lens[EB/OL]. [2026-04-13]. <https://www.kowa-lenses.com/>.
- [17] Work Power. WP-2M0420-C Lens Specifications[EB/OL]. [2026-04-11]. <http://www.work5power.com/?id=139>.
- [18] Computar. MPW3 Series M0528-MPW3[EB/OL]. [2026-04-11]. <https://www.computar-global.com/product/mpw3/>.
- [19] ZLKC. VM0624MP10 Lens[EB/OL]. [2026-04-11]. <https://www.zlkc.com.cn/>.
- [20] Hikrobot. MVL-HF0628M-6MPE machine vision lens[EB/OL]. [2026-04-11]. <https://www.hikrobotics.com/en/machine-vision/productdetail/?id=4871>.
- [21] Soda vision. ricoh FL-CC0418DX-VG[EB/OL]. [2026-04-11]. <https://www.sodavision.com/product/ricoh-fl-cc0418dx-vg/>.