

文章编号: 1002-1582(2026)03-0324-08

手机潜望长焦系统的可靠性优化设计

张变^{1*}, 杨俊成², 贺凌波¹

(1. 浙江舜宇光学有限公司, 浙江 宁波 315400)

(2. 宁波职业技术大学, 浙江 宁波 315800)

摘 要: 为适应手机轻薄化趋势, 潜望式长焦系统普遍采用D-cut(边缘切割)结构设计。然而, 此类镜头在高温高湿环境下常出现中心像散显著漂移的问题。文章结合理论分析与实验验证, 揭示了该现象产生的机理: D-cut结构的非对称性导致镜片在环境应力下长轴与短轴方向的面型变形不一致, 从而诱发了面型误差中的彗差分量, 最终导致中心像散变化。为此, 文章建立了边缘切割保留率与面型变化量的关系模型, 明确了可靠性优化的方向, 通过减少系统内D-cut镜片的数量, 有效改善了可靠性下降的问题。文章设计完成了一款F数为2.48、焦距为15.5mm、光学总长为14.7mm、光学畸变小于2%、相对照度大于36.2%的潜望长焦系统。评价结果显示, 该系统在无限远对焦模式下, 0.9视场内1/4奈奎斯特频率处的MTF值均大于0.6; 在300mm微距模式下, 0.9视场内1/4奈奎斯特频率处的MTF值均大于0.53, 表明该系统像质优良。

关 键 词: 潜望长焦镜头; 非球面透镜; 光学设计; 可靠性设计

中图分类号: TH74

文献标识码: A

Reliability optimization design of periscope telephoto lens

ZHANG Bian^{1*}, YANG Juncheng², HE Lingbo¹

(1. Zhe jiang Sunny Optics Co., Ltd, Ningbo 315400, China)

(2. Ningbo Polytechnic University, Ningbo 315800, China)

Abstract: To accommodate the trend towards slimmer mobile devices, periscope telephoto systems widely employ a D-cut structure design. However, such lenses often face reliability challenges, particularly regarding environmental adaptability. Through theoretical analysis and experimental verification, the mechanism is revealed behind the surface deformation differences along the long and short axes caused by the asymmetry of the D-cut structure under high temperature and humidity. This deformation introduces a coma component in the surface form error, thereby affecting the central astigmatism of the system. A relationship model between the edge cutting retention ratio and surface deformation is established, providing a clear direction for reliability optimization. By reducing the number of D-cut lenses, the reliability under environmental stress is effectively improved, and the design is comprehensively optimized in terms of macro performance. A telephoto system is achieved with an F-number of 2.48, a focal length of 15.5 mm, a total track length (TTL) of 14.7 mm, optical distortion within 2%, and relative illumination greater than 36.2%. At infinity, the MTF values within 0.9 field of view at 1/4 of the Nyquist frequency are greater than 0.6; at the macro distance of 300 mm, the MTF values under the same conditions are greater than 0.53, the imaging quality of the system is excellent.

Keywords: periscope telephoto lens; aspheric lenses; optical design; reliability design

收稿日期: 2026-01-21; 收到修改稿日期: 2026-04-21

基金项目: 宁波职业技术大学科研基金资助项目 (NZ25JW001)

作者简介: 张变 (1991—), 女, 工程师, 从事光学系统设计研究。

* 通讯作者: 1520635881@qq.com

0 引 言

手机长焦镜头经历了从无到有、光学变焦倍率由低到高、镜片群组由简至繁、传感器尺寸由小及大，以及功能从单一长焦向“长焦+微距”二合一融合的突破性演变。然而，上述技术的迭代升级在提升变焦倍率、像素及功能的同时，也导致模组体积不断增大，这与手机机身日益超薄化的设计理念形成了矛盾。随着镜片 D-cut（边缘切割）结构的应用能够有效解决这一空间矛盾，D-cut 镜片结构已广泛应用于主流手机品牌的潜望长焦模组中，该镜片结构核心优势在于不增加机身厚度的前提下，实现长焦距的提升。

然而，行业内普遍存在一个关键可靠性痛点——采用 D-cut 结构的潜望长焦镜头，在高温高湿环境中，出现中心像散漂移、MTF 衰减等问题，成为制约手机潜望长焦技术进一步发展的瓶颈。现有研究多聚焦于温度对镜头性能的影响，文献 1 采用双组补偿设计方法，降低温度对相面漂移的影响，实现长焦镜头的无热化^[1]；文献 2 建立了温度、热膨胀系数和系统焦距的耦合数学模型，获得了最优隔圈材料组合方案，为镜头的焦距热稳定性提供了可行方案^[2]；文献 3 提出一种针对二次成像系统的材料选择方法，通过材料的最佳组合降低温度对镜头性能的影响^[3]；针对 D-cut 镜片引

发可靠性问题的研究较为匮乏，文献 4 建立了镜片的吸湿仿真模型，结果表明镜片的比表面积与镜片吸湿平衡时间呈负相关，为温湿度类可靠性问题提供了改善方向^[4]。本文重点研究 D-cut 镜片在可靠性条件下的面型变化仿真方法及边缘切割保留率与面型慧差分量之间的影响关系，为长焦镜头的可靠性优化设计提供理论依据与可行的指导方向。

1 中心像散产生机理

D-cut 镜头与整圆镜头在可靠性条件下的中心像散变化如图 1 所示。

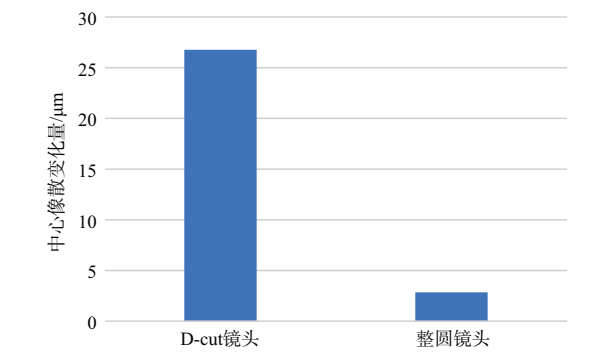


图 1 可靠性条件下的中心像散

分析可得：D-cut 结构镜头的中心像散显著高于整圆镜头，故中心像散变化与 D-cut 结构有关。进一步地，对比 D-cut 结构镜片与整圆镜片在可靠性条件下的面型变化，测试结果如图 2 所示，图中

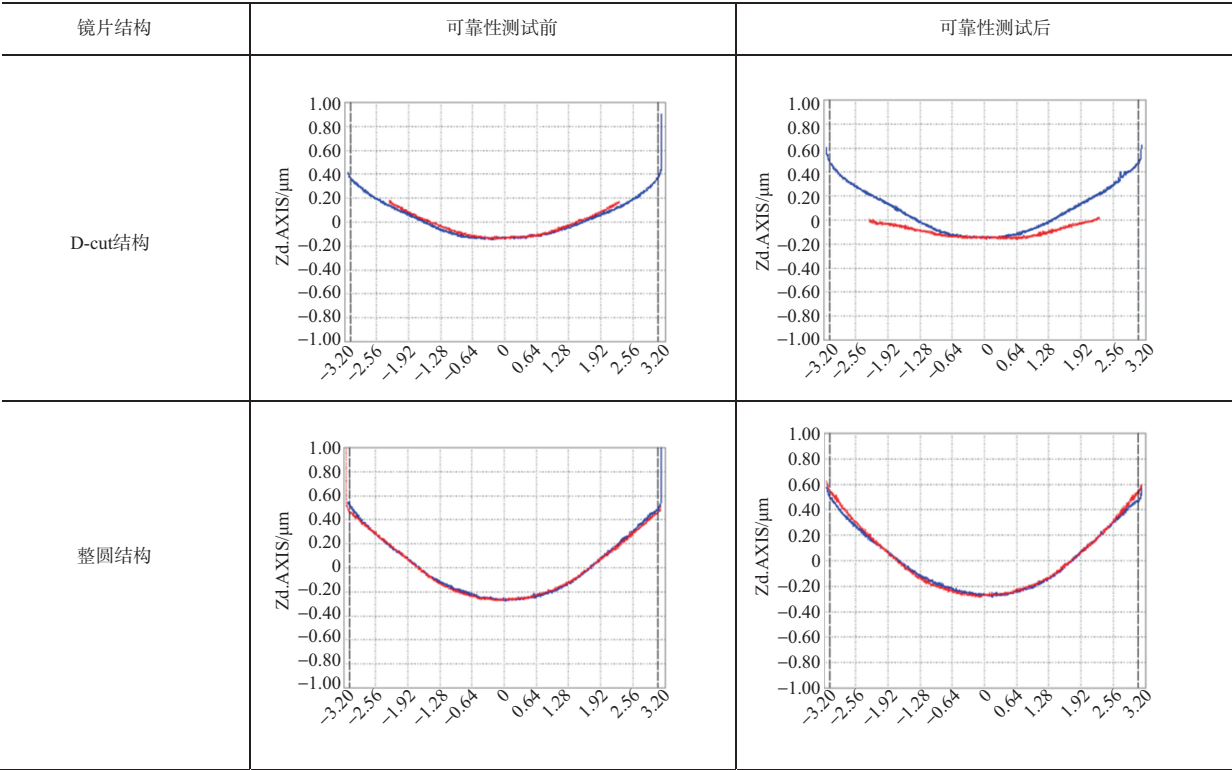


图 2 D-cut 与圆边镜片在可靠性条件下的面型变化

红线与蓝线分别代表在镜片短轴与长轴方向测试的面型，提取实验前后的面型中的彗差分量变化量，如图3所示。

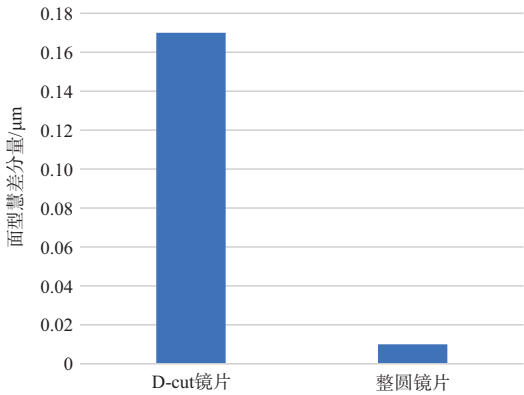


图3 可靠性条件下的面型彗差分量

通过对比高温高湿实验前后的面型变化可知，圆边镜片的彗差分量基本无变化；而 D-cut 镜片在实验后，长轴与短轴方向的面型误差曲线出现明显分叉，表明面型彗差分量显著增大，其原因分析为 D-cut 切割导致短轴方向刚度较弱；长轴方向刚度较高，在温湿度条件下的体积膨胀受刚度约束呈现差异化，长轴刚度高、变形被抑制，短轴刚度低、变形更显著。根据波像差与几何像差理论，光学元件面形误差中的泽尼克彗差分量会引入非对称波前畸变，该彗差分量与系统中心像散近似满足线性传递关系： $A_{as} = K \cdot Z_j$ ，式中 A_{as} 为系统中心像散， Z_j 为镜片面型的泽尼克彗差分量幅值， k 为由系统结构与光学参数共同决定的彗差-像散敏感度系数^[5]。因此，面型彗差分量越大，系统中心像散漂移越显著，MTF 衰减越快。中心像散产生的原因是 D-cut 结构非对称性、材料热膨胀/吸湿特性与结构刚度分布协同作用的结果。

2 D-cut镜片在可靠性条件下的面型慧差分量仿真

为了进一步探究镜片的边缘切割保留率与面型慧差分量之间的影响关系。本文建立了不同的边缘切割保留率的镜片模型，重点分析不同边缘切割保留率的镜片向沿光轴方向的变形量，分别提取长轴与短轴方向的面型变化量，计算面型慧差分量，分析在可靠性条件下 D-cut 比例对面型慧差分量的影响。

2.1 仿真参数设置

建立好的三维 D-cut 镜片模型导入有限元分析软件中并定义材料，所用材料为 EP4500，物性参数如表1所示。

表1 D-cut 镜片物性参数设置表

弹性模量/MPa	泊松比	密度/(kg/m³)	热膨胀系数/℃
2700	0.35	1170	6.5e ⁻⁵

为了分析 D-cut 镜片在长轴与短轴方向的慧差分量，需要指定镜片的 D-cut 方向与圆边方向的分析路径。网格参数设置中镜片的有效径部分需要按照指定路径按等分数划分取 100 个点划分，其他结构按照 0.05mm 大小的四面体结构划分网格。

2.2 仿真分析和结果

将长轴与短轴方向的面型变化数据分别提取，并做差值处理得到理论仿真的面型彗差分量，如图4所示。

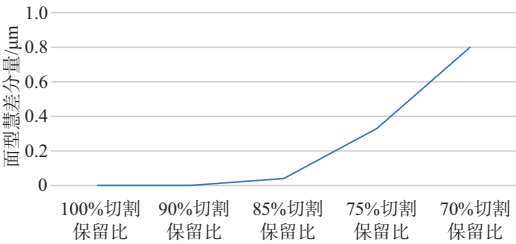


图4 镜片保留比与面型慧差分量之间的关系

从图中可得：镜片的切割保留比与面型变化量密切相关，保留比越大，面型变化量越小。当保留比大于85%时，保留比对变形量的影响趋于平缓；而当保留比小于85%时，面型变化量随保留比的降低呈指数级增长。究其原因，保留比为85%时，镜片有效径区域保持完整，结构刚度的下降趋势较为平缓；而当保留比小于85%时，切割边缘开始侵入有效径区域，且保留比越小，有效径被切除的部分越多，结构刚度大幅削弱，导致受力后面型变形显著。

2.3 实验验证

针对上述结论，本文进行了实验验证，过程如下：实验选取不同 D-cut 切割保留比（100%、90%、85%、75%、70%）的镜片各3片，采用光学轮廓测量仪测试实验前后的面型误差，将镜片置于 85℃、85%RH 的高温高湿环境中静置 48h，实验前后的面型数据如图5所示。提取实验前后的面型慧差分量，并做差值处理，得到可靠性条件下的面型慧差分量变化量，如图6所示。该实验数据与理论仿真结果接近，镜片的切割保留比与面型慧差变化量之间的影响规律一致。基于上述 D-cut 镜片面型变形机理、仿真分析及实验验证，明确了可靠性优化的核心方向为控制 D-cut 保留比、减少 D-cut 镜片数量。

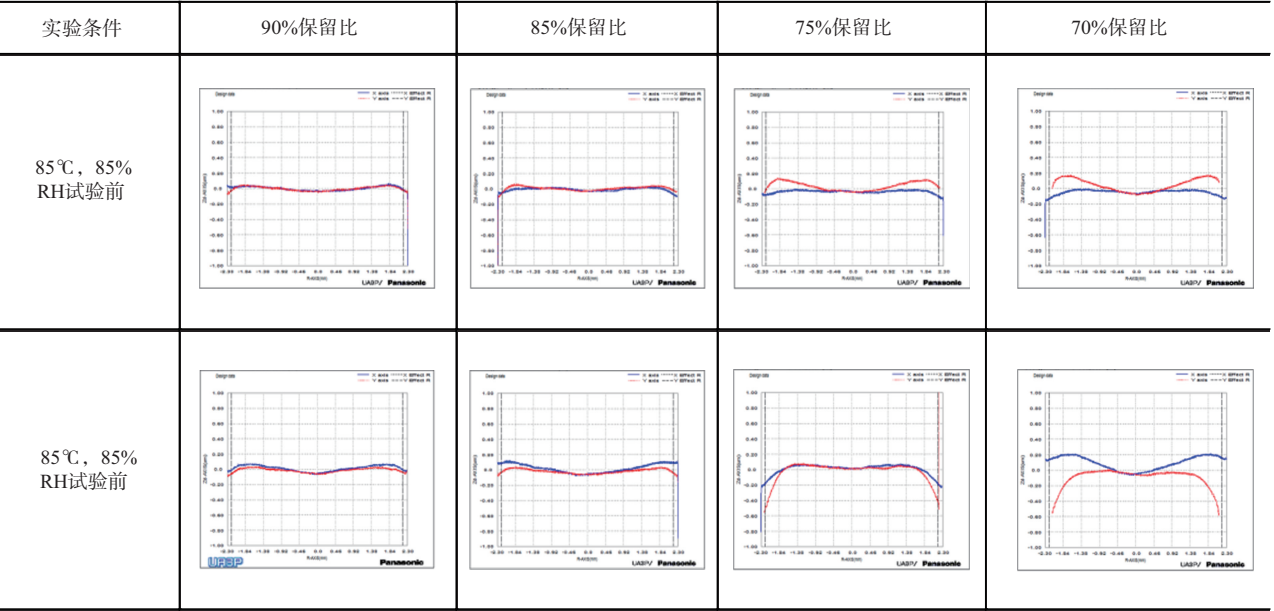


图 5 不同D-cut切割保留比的镜片在可靠性条件下的面型变化

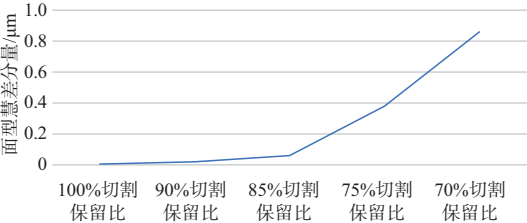


图 6 镜片保留比与面型慧差分量之间的关系

3 可靠性优化设计应用实例

3.1 芯片匹配

互补金属氧化物半导体（CMOS）传感器凭借其高集成度、低功耗、结构精简、长寿命以及性能稳定等显著优势，得到了广泛应用^[6]。本设计选用 Samsung 公司的 S5KJN5 型 CMOS 图像传感器，其工作波段覆盖 435nm 至 650nm 的可见光范围。该芯片有效分辨率为 4096pixel×3072pixel，单个像元尺寸为 1.28μm×1.28μm，像面尺寸为 5.242mm×3.932mm，对角线长度为 6.554mm。结合上述参数，系统的奈奎斯特频率^[7]计算可表示为

$$N_{NY}=\frac{1}{2P_{\text{pixel}}}$$

(1)

式中， P_{pixel} 为传感器像元大小，经计算得系统的奈奎斯特频率为 390lp/mm。考虑模组端的装配无暗角，需要在对角线高度的基础上增大 8% 以上^[8]，本系统的最大像面为 7.154mm。

3.2 设计规格

设计规格参数见表 2。

表 2 潜望长焦镜头主要设计指标

项目	规格
焦距/mm	>15.5
光学畸变/%	<2
F#	<2.5
光谱/nm	435~650
工作距离/mm	无限远&300
后焦/mm	>5
主光线入射角/(°)	<21.5
总长/mm	<14.75

3.3 棱镜材料选择及初始架构确定

3.3.1 棱镜材料选择

本文采用 CodeV 软件设计了一款适用于移动终端的潜望式长焦镜头。为满足手机轻薄化的设计要求，在光学系统前端引入直角棱镜，利用光的全反射原理将系统光轴折转 90°。该设计旨在不增加机身厚度的前提下，通过拓宽横向空间范围来增加镜头焦距，因此，直角棱镜的材料选型尤为关键。折射定律表示为

$$n_1\sin I_i=n_2\sin I_t$$

(2)

式中， n_1 和 n_2 为两种材料的折射率； I_i 为入射角， I_t 为折射角；根基近轴光学方程表示为

$$\tan \theta=y/\text{EFL}$$

(3)

式中， θ 为系统的半视场角； y 为近轴像高；EFL 为系统焦距。

根据式（2）和式（3）计算可得系统的最大半视场角为 11.8°，依据全反射发生的临界条件（其中 θ 为全反射临界角）： $n_2\sin \theta=1$ ，其中 θ 为全反射临界角，利用全反射临界角 θ 与折射角 I_t 之间的几何关系，推导出棱镜材料的折射率需大于

1.6315; 结合常用的材料的成本及其他特性, 本文选择棱镜材料为 HZF52_CDGM。

3.3.2 初始架构选择

初始结构的选择是光学设计的基础与关键环节。由于照相物镜通常结构复杂且伴有较大的高级像差, 一般不采用初级像差理论直接求解的方法确定初始结构, 而是依据设计要求的光学特性与成像质量指标, 从设计手册及文献中选取与设计目标相近的成熟结构作为初始结构。本文所选用的初始结构示意图如图 7 所示。

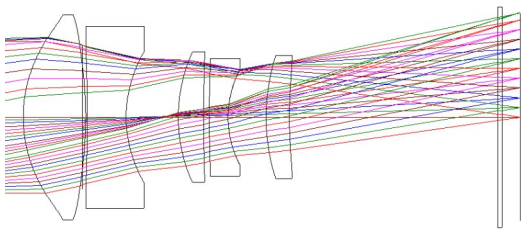


图 7 初始结构示意图

4 优化设计及像质评价

4.1 优化设计

结合第 1 部分揭示的 D-cut 镜片可靠性问题机理及量化关系, 本文针对潜望长焦系统的设计需求, 制定并实施了针对性的优化策略。鉴于该系统采用了 D-cut 结构, 需重点解决其在可靠性测试前后的中心像散变化问题。由前文分析可知, 控制中心像散变化的关键在于优化 D-cut 保留比。本文通过调整系统整体布局, 采取减少 D-cut 镜片数量及增大镜片边缘切割保留率的策略。具体而言, 通过加大镜片二与镜片三之间的空气间隙, 镜片三更换为折射率更高的材料以及镜片曲率控制, 减小镜片三的通过口径, 使后三片镜片采用紧凑型设计, 有效降低了 D-cut 镜片的使用数量。系统优化前后的结构对比如图 8 所示。

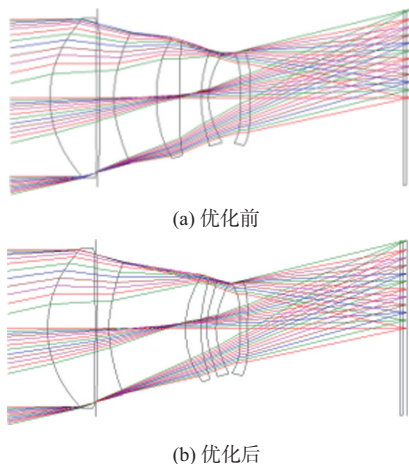


图 8 可靠性优化前后设计实例

基于相同的镜筒外形尺寸, 优化前后的设计实例结构排布如图 9 所示。优化前的结构需对三枚镜片进行 D-cut 处理, 而优化后设计成功将 D-cut 镜片数量由 3 片减少至 2 片。图 10 展示了优化前后镜头的可靠性对比结果, 数据显示, 优化后镜头在可靠性测试条件下的中心像散变化量收敛了 35%。

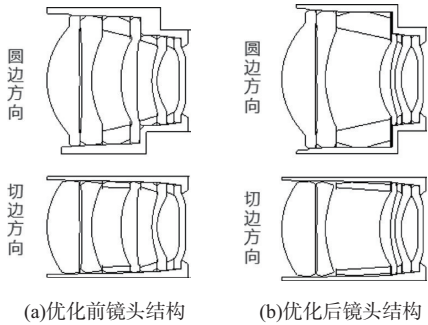


图 9 优化前后镜头结构对比

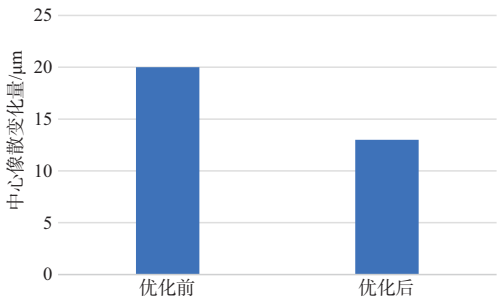


图 10 优化前后镜头可靠性对比

4.2 设计结果

优化后的光学系统结构如图 11 所示。沿光轴从左至右, 系统元件依次排列为: 棱镜、第一透镜、第二透镜、第三透镜、第四透镜及第五透镜。系统的详细结构参数列于表 3, 设计参数与规格指标的对比情况见表 4。经对比分析验证, 最终设计结果完全满足规格要求。

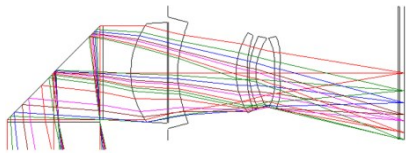


图 11 优化后的镜头结构

4.3 像质评价

调制传递函数 (MTF) 是评价光学系统成像质量的重要指标, 它表征了物体经光学系统成像后, 在不同空间频率下的对比度还原程度。本设计在无限远条件下的 MTF 曲线如图 12 所示, 图中横坐标代表空间频率, 纵坐标代表调制对比度, 该值越高表明像面与物面的对比度越接近。由图 12 (a) 可见, 在 1/4 奈奎斯特频率 (98lp/mm) 处, 0.9 视场以内的 MTF 值均大于 0.6; 图 12 (b) 显示, 在 1/2 奈奎斯特频率 (196lp/mm) 处, 0.9

表 3 镜头的结构参数

面序号	类型	优化前曲率/mm	优化后曲率/mm	优化前厚度/mm	优化后曲率/mm	材料	半半径/mm
物面	球面		∞	∞	∞		
1	球面		∞	5.3	5.30	717360.295	4.548
2	球面		∞	1.5	1.50		3.887
3	非球面	4.32	4.37	1.92	1.96	5439.5592	3.25
4	非球面	-33.40	-33.9	0.03	0.03		3.046
光阑	球面	∞	∞	0.09	0.03		3.01
6	非球面	-153.12	-308.9	0.57	0.50	6146.259	2.99
7	非球面	4.18	4.41	1.74	3.16		2.69
8	非球面	6.28	3.97	0.96	0.59	5671.374	2.144
9	非球面	30.74	6.44	0.86	0.11		2.066
10	非球面	5.08	3.45	0.30	0.36	5439.5592	1.983
11	非球面	2.54	2.32	0.88	0.67		1.855
12	球面	∞	∞	0.43	0.34		1.85
13	非球面	-6.81	-14.26	0.38	0.30	5439.5592	1.847
14	非球面	9.53	9.16	6.28	6.35		1.94
15	球面		∞	0.12	0.11	516800.6417	3.51
16	球面		∞	0.16	0.17		3.53
像面	球面		∞		0		3.58

视场以内的 MTF 值均大于 0.3。此外，系统在 300mm 微距处的 MTF 表现如图 13 所示。图 13（a）表明，在 98lp/mm 频率处，0.9 视场内的 MTF 值均大于 0.53；图 13（b）显示，在 196lp/mm 频率处，0.9 视场内的 MTF 值均大于 0.2。

表 4 规格参数与设计参数对比

项目	规格	设计结果
焦距/mm	≥ 15.5	15.5
光学畸变/%	< 2	1.5
F#	< 2.5	2.48
光谱/nm	435~650	435~650
工作距离/mm	无限远 $\approx$ 300	无限远 $\approx$ 300
后焦/mm	> 5	6.6
主光线入射角/(°)	< 21	20
总长/mm	< 14.7	14.7

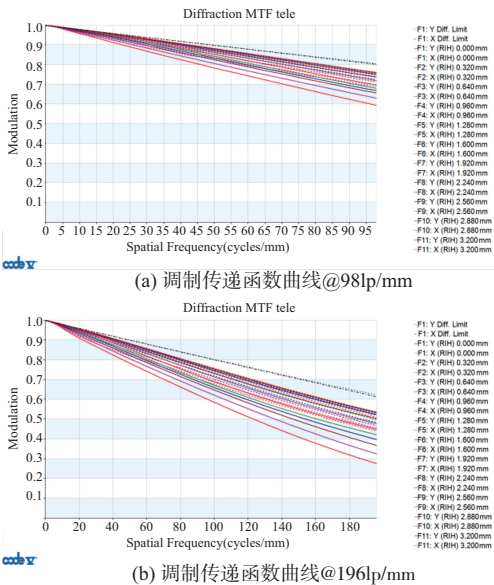


图 12 无限远处的 MTF 表现

场曲和像散显著影响图像的清晰度及边缘成像质量。对于一般镜头而言，通常要求场曲和像散量控制在 0.1mm 以内^[9]。畸变虽然不影响成像清晰度，但会导致物像几何形状的失真。对于一般成像系统，当畸变量小于 5% 时，人眼难以察觉明显变形，即可满足设计要求^[10]。图 14 表示本系统的场曲与畸变曲线，系统的最大场曲值为 0.02mm，最大畸变值为 2%，上述指标均符合设计要求。

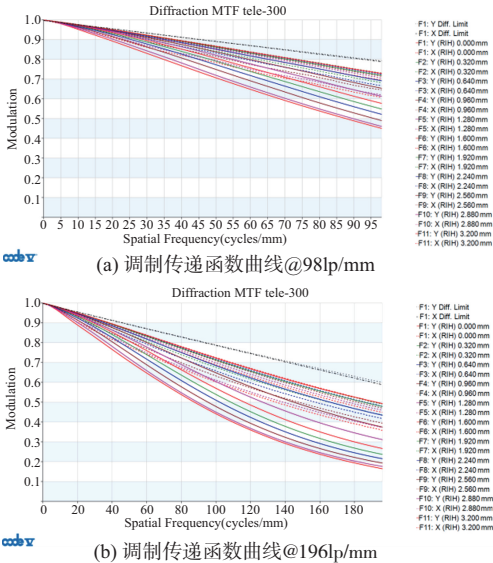


图 13 微距 300mm 处的 MTF 表现

相对照度定义为像面边缘亮度与中心亮度的比值，反映了由轴外光束拦截等因素引起的像面能量衰减情况。本系统的相对照度曲线如图 15 所示，在全像面（最大像高）处的相对照度大于 36.2%。

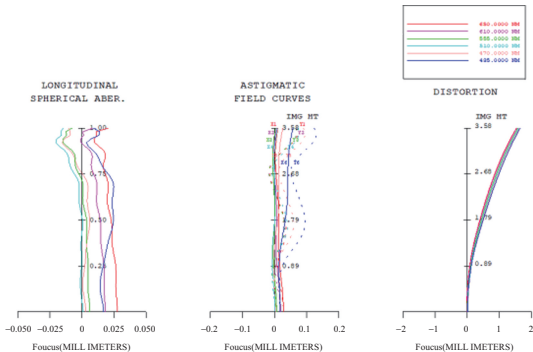


图 14 场曲和畸变

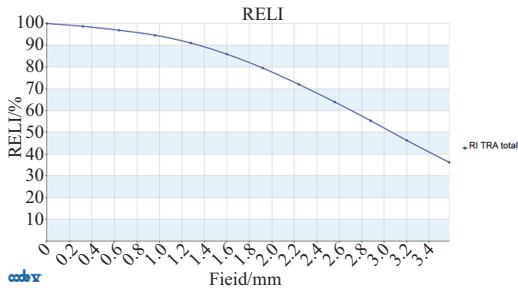


图 15 相对照度

5 公差分析

为使设计满足实际加工，生产及制造需求，通过用 Codev 软件自带的扰动，对系统进行公差分析。文中采用 5 片塑料非球面透镜设计而成。近年来，非球面透镜在加工及检测能力上均取得显著进步，非球面经粗加工、精加工及补偿加工后，通过在位测量装置测量，其面型精度 PV 值为 $0.2\mu\text{m}^{[11]}$ ，综合注塑成型等对面型精度的影响，设置曲率半径公差（DLR）为 $\pm 1.5\text{fringes}$ ，表面不规则公差（IRR）为 0.3fringes 以评估非球面的加工及制造的可行性^[12]；基于透镜的注塑、成型及镀膜等各种工艺能力，设置合理的厚度公差（DLT）、面偏心公差（DLY）；基于透镜的组装等制程能力，设置合理的元件偏心公差（DSY）、Y 方向楔形公差（TRY）、镜筒倾斜公差（BTY）；基于材料的综合公差，设置合理的折射率公差（DLN）及阿倍数公差（DLV），公差参数设置如表 5 所示。采用蒙特卡洛随机抽样法，设定 500 个随机样本，各项公差按正态分布随机扰动，对生成的 500 个样本进行光线追迹与像质计算，分别提取 0F、0.3F、0.5F、0.7F、0.9F 各视场在 1/4 奈奎斯特频率下的 MTF 值，统计不同良率水平对应的 MTF 值，结果如表 6 所示，由表可知，系统在 90% 良率下边缘视场的 MTF 大于 0.3。

表 5 公差参数设置表

序号	类型	数值
1	DLT/mm	0.003
2	DLR/fringe	1.5
3	IRR/fringe	0.3
4	DLY/mm	0.0015
5	DSY/mm	0.002
6	TRY/°	0.05
7	BTY/°	0.05
8	DLN	0.0005
9	DLV/%	0.8

表 6 蒙特卡洛公差分析结果

视场	90%	80%	50%	20%	10%
0F	0.55	0.6	0.62	0.74	0.76
0.3F	0.44	0.53	0.66	0.71	0.74
0.5F	0.39	0.47	0.6	0.68	0.73
0.7F	0.32	0.45	0.59	0.66	0.69
0.9F	0.3	0.4	0.5	0.6	0.62

注：表中数值为对应良率及对应视场下的 MTF 值 1/4 奈奎斯特频率处的 MTF 值，无单位。

6 结 论

本文针对手机潜望式长焦镜头在轻薄化设计中采用 D-cut（边缘切割）镜片所引发的可靠性问题，展开了一系列深入研究，并提出了一套行之有效的优化设计方法。主要工作与结论如下：

（1）揭示了 D-cut 镜片导致像质衰减的物理机制。通过实验与理论分析，本文指出，D-cut 结构因其非对称性，在高温高湿可靠性试验后，其面型误差中的泽尼克彗差分量会发生显著变化。该彗差分量通过“彗差—像散敏感度系数”线性地贡献于光学系统的中心像散，最终导致调制传递函数（MTF）在测试后出现下降。这从根本上解释了行业内 D-cut 镜片镜头可靠性问题的成因。

（2）量化了 D-cut 保留比与镜片面型稳定性的关键关系。通过建立不同 D-cut 保留比（70~100%）的镜片模型并进行受力仿真，研究发现保留比是影响结构刚性和面型稳定性的决定性参数。存在一个约 85% 的临界保留比：当保留比高于此值时，面型变化平缓；一旦低于此值，切割开始侵入光学有效区域，导致镜片结构刚度急剧下降，在环境应力下面型变形量（彗差变化）呈指数级增长。该结论得到了实验验证，为设计提供了明确的量化指导。

（3）提出并实践了面向可靠性的长焦镜头优化设计策略。基于上述机理，本文确立了以“减少 D-cut 镜片数量”和“增大镜片边缘切割保留

率”为核心的设计优化方向。通过光学系统布局的重新设计,成功将一款潜望式长焦镜头的D-cut镜片数量从3片减少至2片。优化后的设计实例表明,该策略能有效控制镜头的中心像散漂移,使可靠性测试条件下的中心像散变化量收敛了35%。

(4) 完成了满足规格要求的高可靠性镜头设计并验证其可制造性。本文最终设计了一款有效焦距15.5mm、F#2.48的潜望式长焦镜头。像质评价表明,该镜头在无限远及300mm微距工作状态下,其MTF、场曲、畸变、相对照度等关键指标均达到或优于设计规格。进一步的蒙特卡洛公差分析证明,在设定的合理工艺公差下,系统在90%良率时边缘视场MTF仍大于0.3,具备了良好的量产可行性。

参考文献:

- [1] 张丽芝,陆秋萍,等.长焦镜头光学系统设计及无热化研究[J].光学学报,2024,44(08):004—010.
Zhang Lizhi, Lu Qiuping, et al. Optical system design and athermalization of telephoto lens[J]. Acta Optica Sinica, 2024, 44(08): 004—010.
- [2] 胡雪晴,占子涵,金光.机载像方远心镜头焦距热稳定设计方法[J].红外与激光工程,2025,54(7):268—276.
Hu Xueqing, Zhan Zihan, Jin Guangl. Design method of focal length thermal stability for airborne image-space telecentric lens[J]. Infrared and Laser Engineering, 2025, 54(7): 268—276.
- [3] 彭远,魏鸿达,刘洋,等.宽温度范围内折衍混合中波红外消热差光学系统设计[J].红外与激光工程,2024,53(10):203—213.
Peng Yuan, Wei Hongda, Liu Yang, et al. Design of refractive-diffractive hybrid medium wave infrared thermal suppression optical system in a wide temperature range[J]. Infrared and Laser Engineering, 2024, 53(10): 203—213.
- [4] 杨俊成,张变,张芳.镜片吸湿行为对镜头性能的影响及改善[J].光学技术,2025,51(04):474—478.
Yang Juncheng, Zhang Bian, Zhang Fang, et al. Influence and improvement of lens hygroscopic behavior on lens performance[J]. Optical Technique, 2025, 51(04): 474—478.
- [5] Wan K, Gu Z, Yan C. An analytic expression for the field dependence of three-order Zernike aberrations in decentered and/or tilted optical systems[J]. Optics Communications, 2024, 565.
- [6] 高永峰,张变,宋光辉,等.虹膜识别镜头的光学设计[J].激光与光电子学进展,2017,54(01):232—239.
Gao Yongfeng, Zhang Bian, Song Guanghui, et al. Optical design of iris recognition lens[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(01): 232—239.
- [7] 丁岩,张乃文,杨超,等.基于逐点构建的自由曲面低畸变车载镜头设计[J].光学学报,2024,44(14):231—241.
Ding Yan, Zhang Naiwen, et al. Design of freeform surface low-distortion automotive lens based on point-by-point construction[J]. Acta Optica Sinica, 2024, 44(14): 231—241.
- [8] 朱佳巍,王旗,范俊辉,等.一款小型化红外广角镜头的设计[J].激光与光电子学进展,2018,55(07):139—144.
Zhu Jiawei, Wang Qi, Fan Junhui, et al. Design of a miniaturized infrared wide-angle lens[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(07): 139—144.
- [9] LI X T, Cen Z F. Geometrical optical aberrations and optical design[M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2007, 300—303.
- [10] 田曼力,薛常喜.变焦型双光路车载抬头显示光学系统设计[J].光学学报,2024,44(14):199—209.
Tian Manli, Xue Changxi. Design of variable focal plane dual-light-path vehicle head-up display system[J]. Acta Optica Sinica, 2024, 44(14): 199—209.
- [11] 张亮,郭曦鹏,王定文,等.光学非球面超精密切削的在位测量及补偿加工[J].金刚石与磨料磨具工程,2022,42(01):18—22.
Zhang Liang, Guo Xipeng, Wang Dingwen, et al. On-machine measurement and compensation machining of ultra-precision cutting of optical aspheric surface[J]. Diamond & Abrasives Engineering, 2022, 42(01): 18—22.
- [12] 蒋曲博,郭智元,卢泽楷,等.1300万像素广角手机镜头设计[J].光学技术,2024,50(05):520—525.
Jiang Qubo, Guo Zhiyuan, Lu Zekai, et al. Design of 13 megapixel wide-angle mobile phone lens[J]. Optical Technique, 2024, 50(05): 520—525.