

物理与光电工程学院

《光学设计》课程设计

班 号：20212511

专 业：光电信息科学与工程

第几小组：第一小组

任课教师：卢春莲 严云翔

2023 年 6 月

目 录	2
-----	---

目 录

1 所选题目	3
2 对题目内容的分析	3
2.1 透射式望远镜（开普勒望远镜）	3
2.2 望远物镜的主要光学特性和光学参数	3
2.3 像差的矫正	4
2.4 需要矫正的像差	4
2.4.1 对不同色光不同的矫正	4
2.4.2 双胶合矫正色差和球差	4
2.5 像质评价	4
2.5.1 对于色差	4
3 Zemax 设计的过程及设计结果	5
3.1 根据设计要求选择整体结构	5
3.2 玻璃的计算和选取	5
3.3 数据分析	6
3.4 zemax 操作和基本设置	7
3.5 镜头参数的设置	7
3.5.1 系统孔径，光线追迹参数的设置以及其他杂项	8
3.6 基础分析	8
3.7 系统优化	11
4 光路的搭建（要严格按照设计结果进行搭建，如果有改动要说明）	14
4.1 实际搭建	14
5 搭建的光路是否实现了设计的目标（需要把搭建的光路以及最后所成的像，用照片或者图片的方式放到报告当中）	15
6 小组名单和分工	16
7 总结与预期	16
8 附录（彩色打印实验图）	17

1 所选题目

设计透射式望远物镜（为消色差设计,可采用非球面。）

参数	数值	参数	数值
RMS radius	$< 20\text{mrad}$		
2ω	5°	Γ	>2

表 1: 设计参数图

2 对题目内容的分析

2.1 透射式望远镜（开普勒望远镜）

开普勒望远镜是一种折射式望远镜，由一个凸透镜作为物镜和一个凸透镜作为目镜组成。它的光学原理是利用两个凸透镜的放大效果，将远处的物体形成一个倒立的放大虚像。开普勒望远镜的优点是**视野宽，放大倍数更大**。

物镜的像方焦点和目镜的物方焦点重合，位于两透镜之间，形成的像是倒立的实像。出射光瞳在目镜外面，能获得较大的视场。由于成的是实像，它可方便地安置十字丝分划板，以作瞄准、定位和测量之用。原理图如下所示：

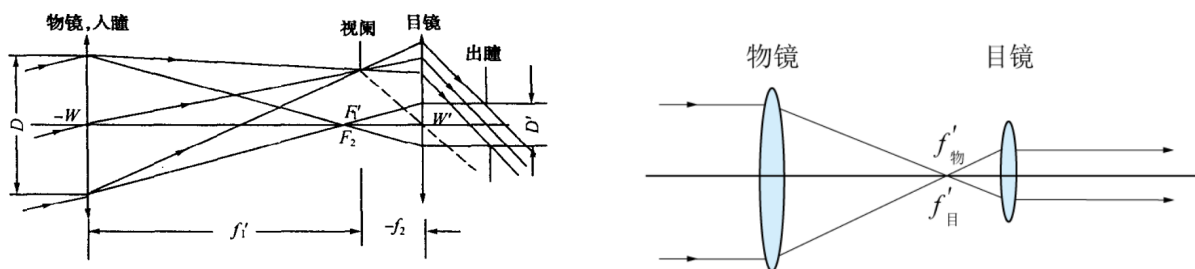


图 1: 原理光路图

2.2 望远物镜的主要光学特性和光学参数

相对孔径不大

在望远系统中, 入射的平行光束经过系统以后仍为平行光束此物镜的相对孔径 ($\frac{D}{f_1}$) 和目镜的相对孔径 ($\frac{D'}{f_2}$) 是相等的。目镜的相对孔径主要由出瞳直径 D' 和出瞳距离 l' 决定。为了保证出瞳距离, 军用望远镜系统的出瞳直径 D' 约为 4mm , 目镜的焦距 f_2' 一般大于或等于 25mm , 这样, 目镜的相对孔径约为:

视场角小 不大于 10°

$$\frac{D'}{f_2'} = \frac{4}{25} = \frac{1}{6}$$

望远镜视放大倍率

$$\Gamma = \frac{\tan W'}{\tan W} = -\frac{f_1'}{f_2'} = \frac{D}{D'} \quad (1.1)$$

2.3 像差的矫正

2.4 需要矫正的像差

由于望远物镜视为较小，视边缘的成像质量一般允许适当降低。因此望远物镜中都不矫正对应像高 y' 的二次方以上的各种单色像差（像散、场曲、畸变）和垂轴色差，只用校正球差、彗差和轴向色差。

2.4.1 对不同色光不同的矫正

望远镜属目视光学仪器，设计目视光学仪器（包括望远镜和显微镜）一般对 F(486.13nm) 和 C(656.28nm) 光计算和校正色差，对 D (589.3nm) 光校正单色像差。

2.4.2 双胶合矫正色差和球差

望远镜物镜要求校正的像差主要是轴向色差、球差和彗差。由薄透镜系统的初级像差理论知道，一个薄透镜组除了校正色差所外，还能校正两种单色像差，刚好符合校正望远物镜像差的需要。

由于双胶合物镜无法矫正像散，场曲，因此它的可用视场一般不超过 10° 。

同时查表得到满意成像和相对孔径之间的关系

f_1'	50	100	150	200	300	100
$\frac{D}{f_1'}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3.5}$	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{5}$	$\frac{1}{6}$	$\frac{1}{10}$

表 2: 相对孔径表

同时一般双胶合物镜的最大口径不超过 100mm，这是因为当直径过大时，胶合不牢固，同时当温度改变时，胶台面上容易产生应力，使成像质量变坏。

2.5 像质评价

2.5.1 对于色差

色差是指由于不同波长的光在介质中的折射率不同，导致光的聚焦位置不同，从而影响成像质量的现象。Zemax 中分析色差的方法有以下几种：

- ◇ 观察色差曲线的形状和高度
- ◇ 使用 Spot Diagram 分析点扩散函数 (PSF)，观察不同波长的光在像面上的分布情况，以及彩色圆盘的大小和形状。
- ◇ 观察点列图

使用 Wavefront Map 分析波前图，观察不同波长的光在像面上的相位差情况，以及色差引起的波前畸变。使用 MTF Plot 分析调制传递函数 (MTF)，观察不同波长的光对系统分辨率的影响，以及色差对 MTF 曲线的降低。使用 Chromatic Focal Shift 分析色散焦移，观察不同波长的光在系统中的最佳聚焦位置，以及色散焦移量和方向。

3 Zemax 设计的过程及设计结果

3.1 根据设计要求选择整体结构

因为是消色差设计（单透镜的色差和单色像差很大），同时根据望远镜的常见结构，我们显然选择两个双胶合透镜，一个作为物镜，一个作为目镜。接下来我们需要在老师给出的玻璃库中选取合适的玻璃，一个作为目镜，一个作为物镜。结构如图 1 原理光路图所示。

选定玻璃后，只能调空气厚度。实际光路要求轴长不超 1m，空气厚度不低于 25mm。

3.2 玻璃的计算和选取

给出可用的玻璃如下：

序号	型号	品名	规格	相对孔径
1	GCL-010604	双胶合消色差透镜	$\Phi 25.4 \ f100.0$	0.254
2	GCL-010606	双胶合消色差透镜	$\Phi 25.4 \ f200.0$	0.127
3	GCL-010615	双胶合消色差透镜	$\Phi 50.8 \ f100$	0.508
4	GCL-010617	双胶合消色差透镜	$\Phi 50.8 \ f200$	0.254
5	GCL-010631	双胶合消色差透镜	$\Phi 30 \ f75$	0.4
6	GCL-010632	双胶合消色差透镜	$\Phi 30 \ f90$	0.33
7	GCL-010640	双胶合消色差透镜	$\Phi 40 \ f120$	0.33
8	GCL-010641	双胶合消色差透镜	$\Phi 40 \ f250$	0.16
9	GCL-010642	双胶合消色差透镜	$\Phi 40 \ f300$	0.133
10	GCL-010650	双胶合消色差透镜	$\Phi 25.4 \ f30$	0.847
11	GCL-010654	双胶合消色差透镜	$\Phi 25.4 \ f75$	0.472
12	GCL-010656	双胶合消色差透镜	$\Phi 25.4 \ f175$	0.145

表 3: 可用玻璃列表

首先选择物镜，其相对孔径要满足表 2. 故首先排除掉 3, 5, 6, 10, 11.

首先要满足物镜焦距 f_1' 满足

$$f_1' > 2f_2'$$

并且双胶合物镜的选择要满足相对孔径，在剩下的里面选择相对孔径较小的 GCL-010606 作为物镜。再选择 GCL-010631 作为目镜。他们的关键参数如下

类型	型号	品名	规格	Φ	$R1$	$R2$	$R3$
物镜	GCL-010606	双胶合消色差透镜	$\Phi 25.4, f200.0$	25.4	119.758	-90.616	-277.773
双凸边缘厚	弯月边缘厚	双凸中心厚	弯月中心厚	双凸材料	弯月材料	T_c	T_e
2.03	3.104	3.6	2.5	H-K9	H-ZF2	6.1	5.1
类型	型号	品名	规格	Φ	$R1$	$R2$	$R3$
目镜	GCL-010631	双胶合消色差透镜	$\Phi 30.0, f75.0$	30	44.118	-34.554	-106.839
双凸边缘厚	弯月边缘厚	双凸中心厚	弯月中心厚	双凸材料	弯月材料	T_c	T_e
1.846	4.367	7.9	2	H-K9	H-ZF2	9.9	6.2

表 4: 透镜选择及其参数 (偶数行是数值，奇数行是内容)

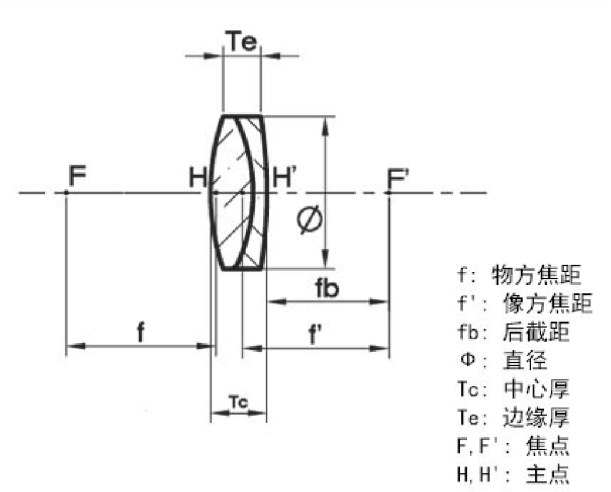


图 2: 透镜参数示意图

同时经过计算初始像差，其较小，满足要求。

3.3 数据分析

计算一些参数如下

视觉放大倍率

$$\Gamma = -\frac{f_1'}{f_2'} = -\frac{200}{75} = -2.667 \tag{1.2}$$

镜筒长度 $\approx f + f' = 275mm$

人瞳直径 D

$$D = 25.4mm \tag{1.3}$$

出瞳直径 D'

$$D' = 30mm$$

(1.4)

3.4 zemax 操作和基本设置

按照选取的初始结构，将镜头数据输入 zemax 中的镜头数据中。并且设置视场角，以及光线追迹的参数，波长。（这里我们使用 zemax2021 进行演示，因为其更加人性化）

3.5 镜头参数的设置

在 zemax 中，如果材料不为空，那么表示空气层。厚度表示该面到下一个面的中心厚度。

对于双胶合透镜如 (图 2 透镜参数示意图) 以及 (表 4: 透镜选择及其参数) 所示，其需要填写三个面的半径以及两个面的厚度，一个双凸边缘厚，一个弯月中心厚。同时根据初始结构，我们需要设置两个透镜的距离，即物镜的后表面到目镜的前表面的距离，根据开普勒望远镜的特点，设置为 $275mm$ ，并将其设置为变量进行优化。

表面类型	表面标注	曲率半径	厚度	材料
标准面	物面	∞	∞	
标准面	物镜前表面	119.758	3.6	H-K9
标准面	胶合面	-90.616	2.5	H-ZF2
标准面	物镜后表面	-277.773	275	(空气)
标准面	目镜前表面	44.118	7.9	H-K9
标准面	胶合面	-34.554	2	H-ZF2
标准面	目镜后表面	-106.839	∞	(空气)
标准面	像面	∞	∞	

表 5: 镜头参数表

	表面 类型	标注	曲率半径	厚度	材料	膜层	净口径	延伸区	机械半直径	圆锥系数	TCE x 1E-6
0	物面 标准面 ▾		无限	无限			无限	0.000	无限	0.000	0.000
1	光阑 标准面 ▾	物镜前表面	119.758	3.600	H-K9		7.510	0.000	7.572	0.000	-
2	标准面 ▾	胶合面	-90.616	2.500	H-ZF2		7.533	0.000	7.572	0.000	-
3	标准面 ▾	物镜后表面	-277.773	275.000 V			7.572	0.000	7.572	0.000	0.000
4	标准面 ▾	目镜前表面	44.118	7.900	H-K9		15.266	0.000	15.266	0.000	-
5	标准面 ▾	胶合面	-34.554	2.000	H-ZF2		15.145	0.000	15.266	0.000	-
6	标准面 ▾	目镜后表面	-106.839	25.000			15.059	0.000	15.266	0.000	0.000
7	像面 标准面 ▾		无限	-			11.684	0.000	11.684	0.000	0.000

图 3: 镜头参数填写示意图

3.5.1 系统孔径，光线追迹参数的设置以及其他杂项

入瞳直径为物镜直径, 设置入瞳直径为 30mm，并勾选无焦像空间^①。

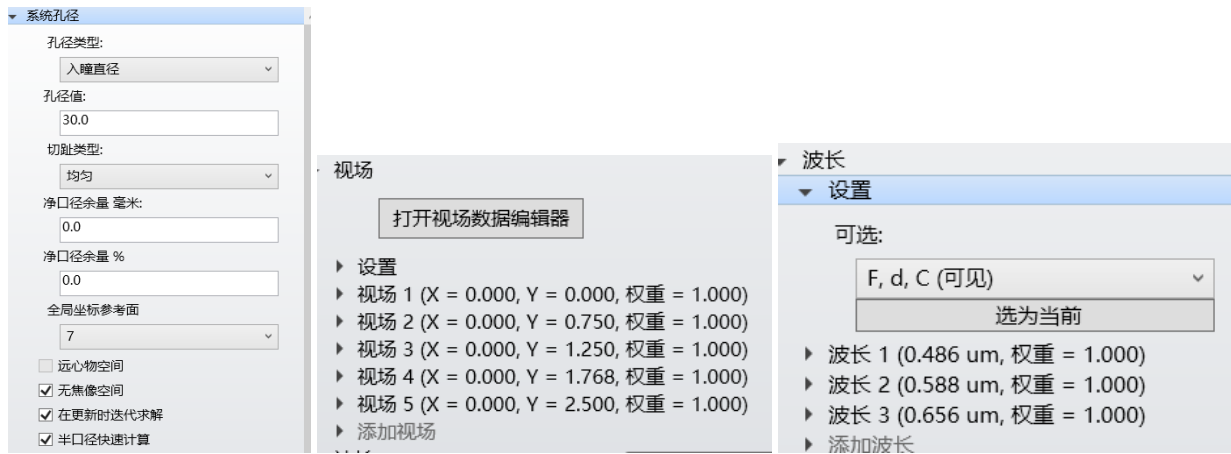


图 4: 系统孔径设置 (左)，追迹光线视场设置 (中)，追迹光线波长设置 (右)

一般设置视场角都是按照带区设置：0、0.3、0.5、0.707、1（常用这 5 个带）比如你的系统的全视场是 20 度，那么半视场是 10 度，输入 zemax 的 5 个带区分别为：0 度、3 度、5 度、7、07 度、10 度也没有必要非要输入 5 个带区，可多可少但是 0 带、0.707 带和最边缘的 1 带最好有，这 3 个带很有实际价值。这里我们的全视场 5°，所以我们对半视场分别乘为 0、0.3、0.5、0.707、1，得到追迹光线视场设置。

波长就使用常见的 F, d, c 光。

3.6 基础分析

完成上述操作后，我们查看系统光路图以及查看系统报告和和一些其他曲线，检验系统是否满足要求。

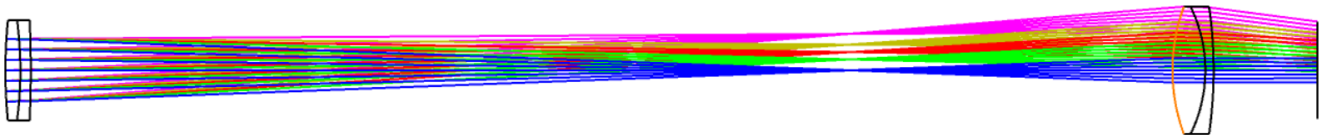


图 5: 2D 系统光路示意图

名称	数据	名称	数据	名称	数据
总长	316	近轴放大率	0	入瞳位置	0
出瞳直径	11.04874	出瞳位置	72.38755	最大径向视场	2.5
主波长	0.5875618 m	角放大率	-2.715241	透镜单位	毫米

表 6: 系统数据

同时注意到这里由于我们使用的物方光线是平行光束，所以近轴放大率^②为 0。

^①在 Zemax 中，"无焦像空间模式" 是一种模拟光线在光学系统中传播的方式。该模式考虑了光线在非理想光学元件（例如透镜）中的传播过程，以及由此引起的畸变和像差。

在无焦像空间模式下，Zemax 会通过模拟光线的传播路径来计算系统中的像差。这些像差包括球差、彗差、色差、像场曲率等。通过分析这些像差，可以优化光学系统设计，以改善成像质量。

^②近轴像平面上的近轴主光线高与物高的比值

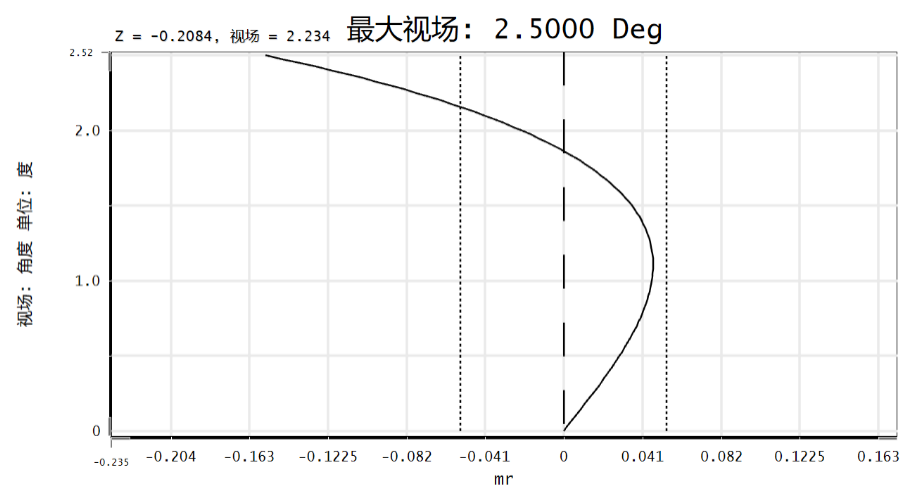


图 6: 在 F 光 C 光下的色差曲线

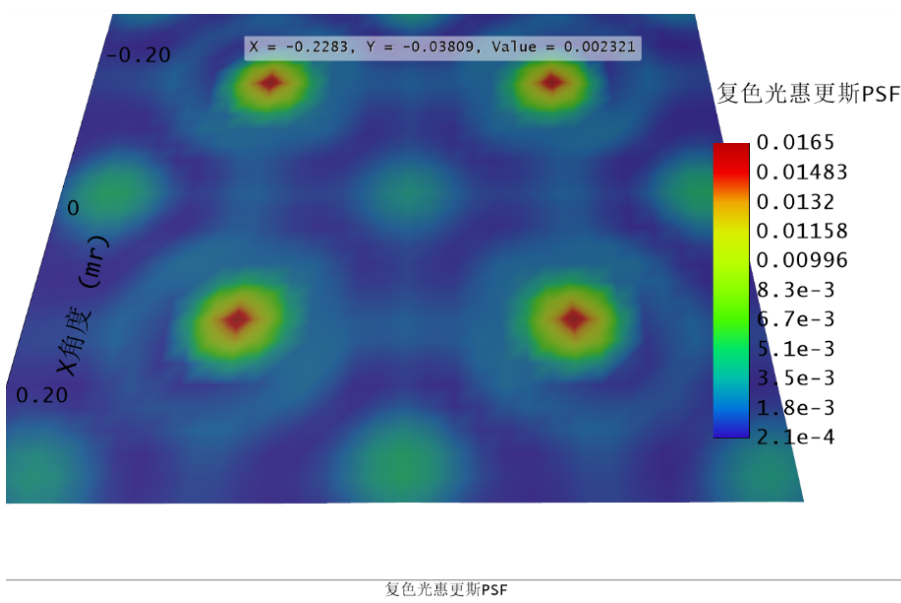


图 7: 复色光惠更斯 PSF

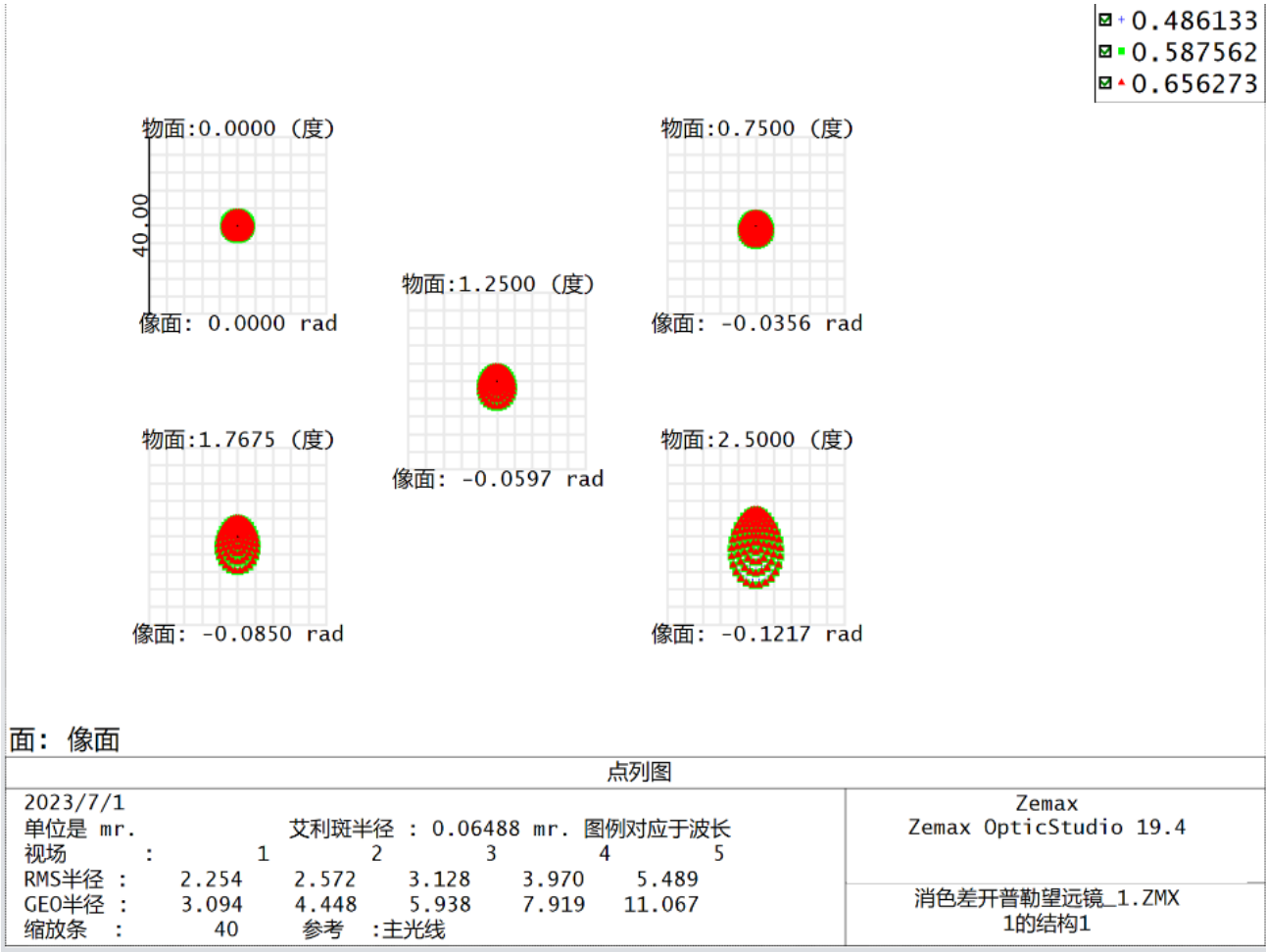


图 8: 标准点列图以及 RMS 半径

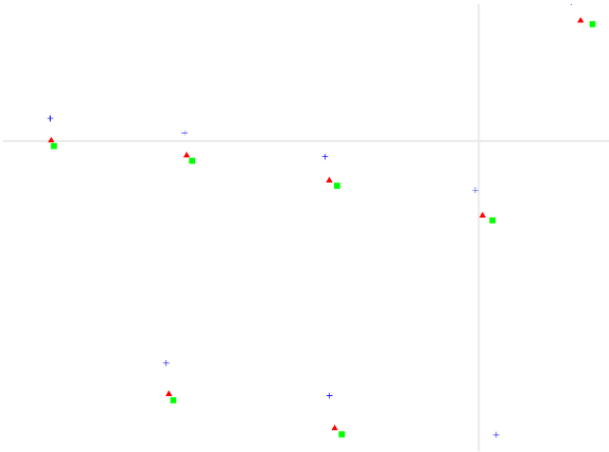


图 9: 点列图放大（观察色差）

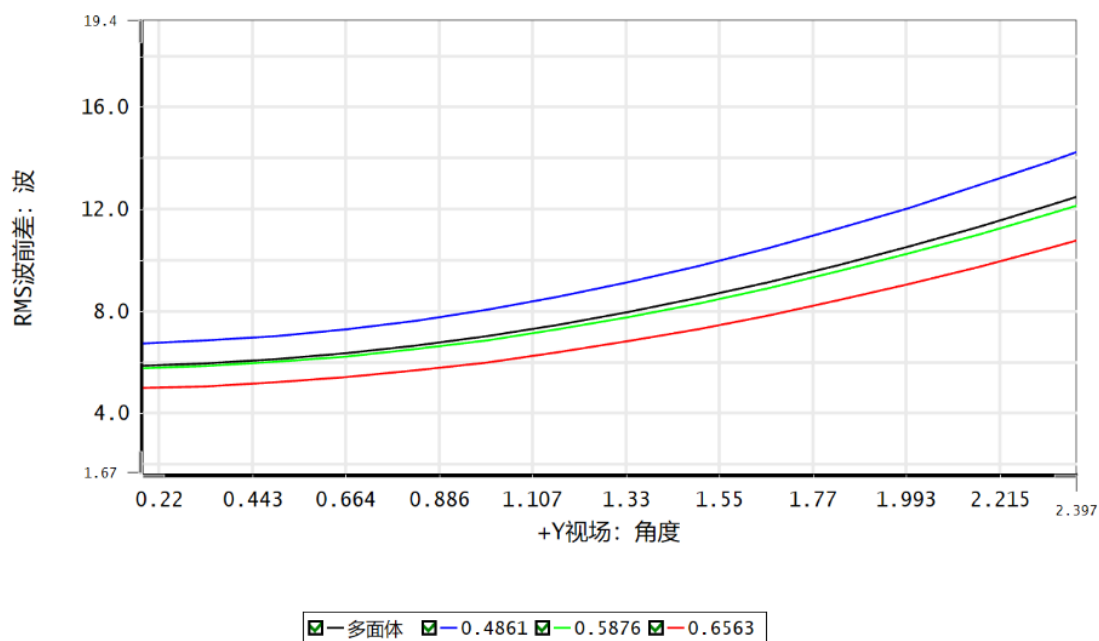


图 10: RMS-视场

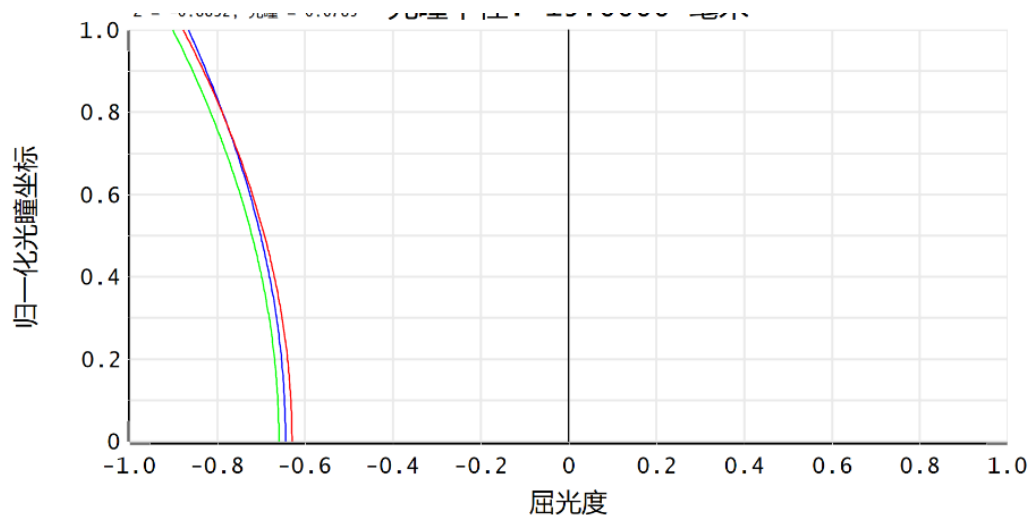


图 11: 未校正的轴向像差

显然根据以上各图我们可以看到色差得到了很好的消除,我们完成了消除色差的设计。同时 $RMS_{MAX} < 20mrad$, 也满足设计要求。但是**轴向像差还是很大**, 所以我们需要对其进行校正。我们将两透镜之间的空气厚度设置为变量, 并使用 zemax 进行自动优化。

3.7 系统优化

前文中变量已设置完成。在设置变量完成后需要进行评价函数的设置, 一旦设置好变量, 现在就可以构造默认的评价函数 (Merit Function)。评价函数是在一个完全独立于镜头数据编辑器的编辑器中构造的, 称为评价函数编辑器 (Merit Function Editor)。通过点击: 优化 (Optimize)> 评价函数编辑器 (Merit Function Editor), 打开评价函数编辑器。

评价函数 (Merit Function) 是光学系统与指定目标的接近程度的数值表示。

在评价函数编辑器中，OpticStudio 使用操作数列表，这些操作数分别代表系统的不同约束或目标。当评价函数构建完成后，OpticStudio 中的优化算法会尝试使评价函数的值尽可能小。

虽然您可以自己构建评价函数，但是让 OpticStudio 为您构建评价函数更加容易。默认的评价函数可以通过从评价函数编辑器的菜单栏选择优化向导与操作数 (Wizards and Operands)> 优化向导 (Optimization Wizard) 来构建。

选择此选项后，将出现优化向导 (Optimization Wizard) 对话框，可以从中选择各种选项来定义默认的评价函数。我们选择针对于质心的 RMS 半径进行优化，所有这些选项都已经内置到 OpticStudio 的优化向导中。

为了防止单透镜变得太厚或太薄,对该透镜的厚度设置边界约束是很重要的。在优化向导 (Optimization Wizard) 中，可以在厚度边界 (Boundary Values) 部分设置玻璃和空气厚度的边界约束。通过“空气 (Glass)”选项，可以将最小、最大和边缘厚度值手动输入到适当的条目中。此处我们设置其在 **260-280** 之间变化。

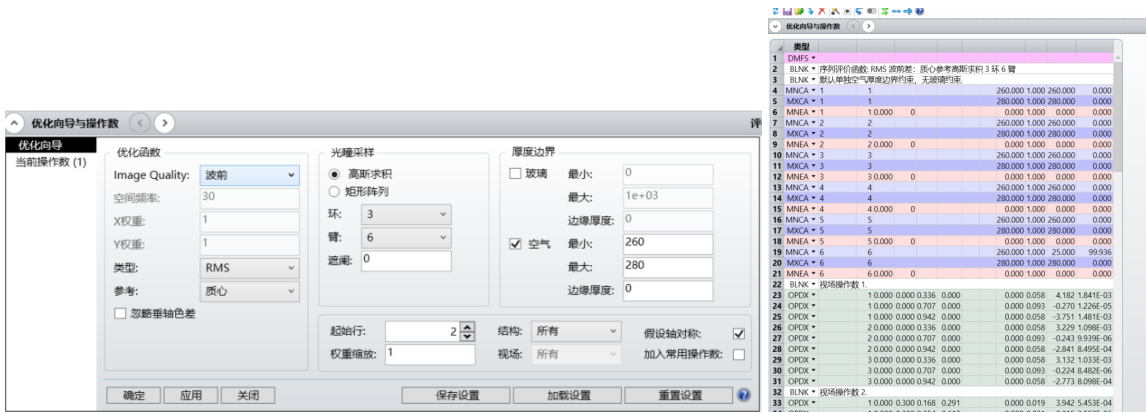


图 12: 评价函数助手（做）及自动生成的评价函数

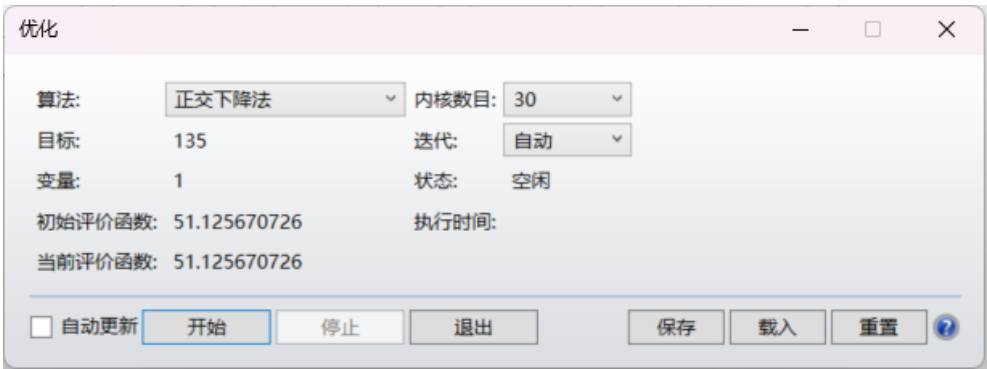


图 13: 优化过程示意图

自动优化之后，系统参数如下

空气厚度	269.101mm	RMS_{MAX}	1.41378057E+00 mr	角放大率	-2.637129
------	-----------	-------------	-------------------	------	-----------

表 7: 优化后系统参数表

以下为优化后的效果图

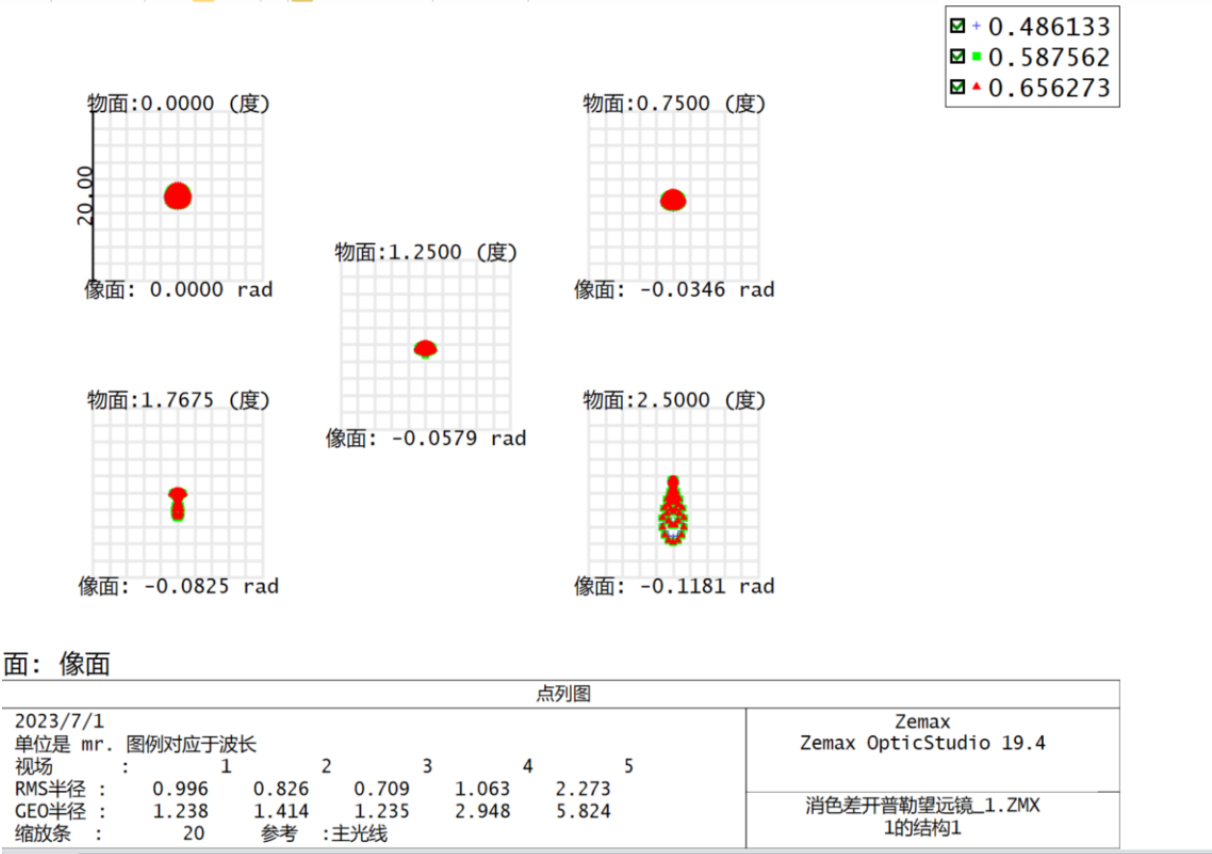


图 14: 优化后标准点列图

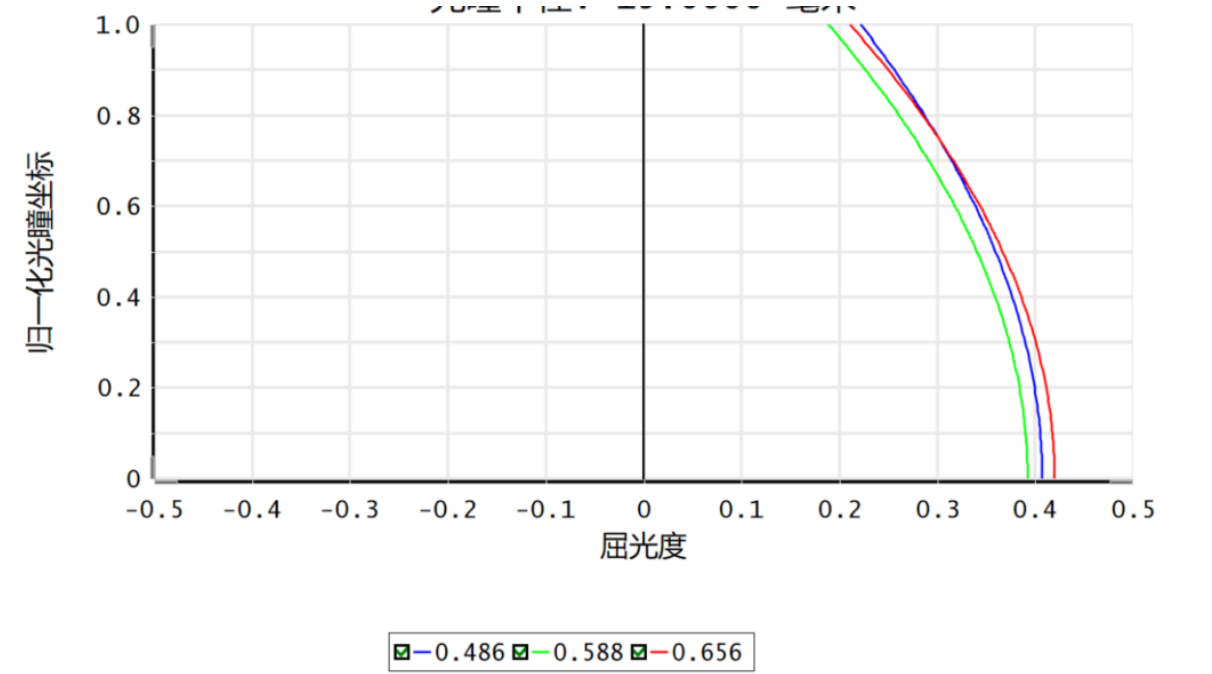


图 15: 优化后轴向色差示意图

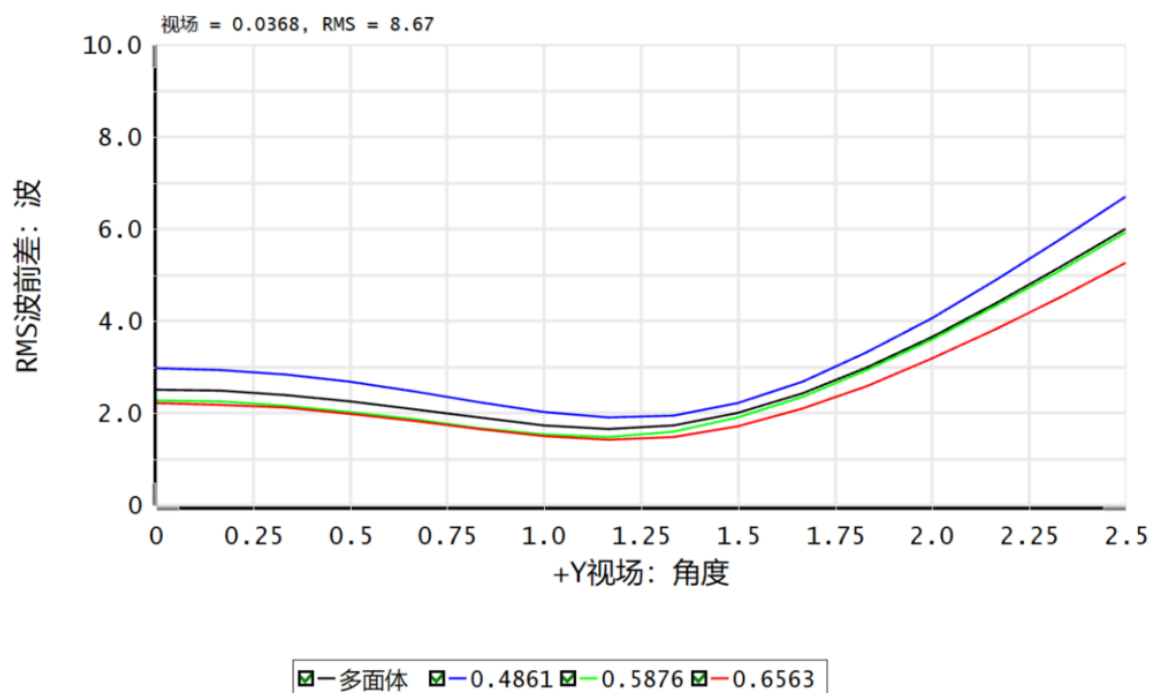


图 16: 优化后 RMS 示意图

至此优化完毕，题目要求的设计要求全都满足，并且色差和轴向色差均比较小。

4 光路的搭建（要严格按照设计结果进行搭建，如果有改动要说明）

4.1 实际搭建

我们小组在按照 Zemax 仿真设计的结果选择玻璃，搭建，调整，十分顺利，实际效果明显，无差错。

5 搭建的光路是否实现了设计的目标(需要把搭建的光路以及最后所成的像,用照片或者图片的方式放到报告当中)15



图 17: 合照以及光路示意图（正在观测）

5 搭建的光路是否实现了设计的目标（需要把搭建的光路以及最后所成的像的像，用照片或者图片的方式放到报告当中）

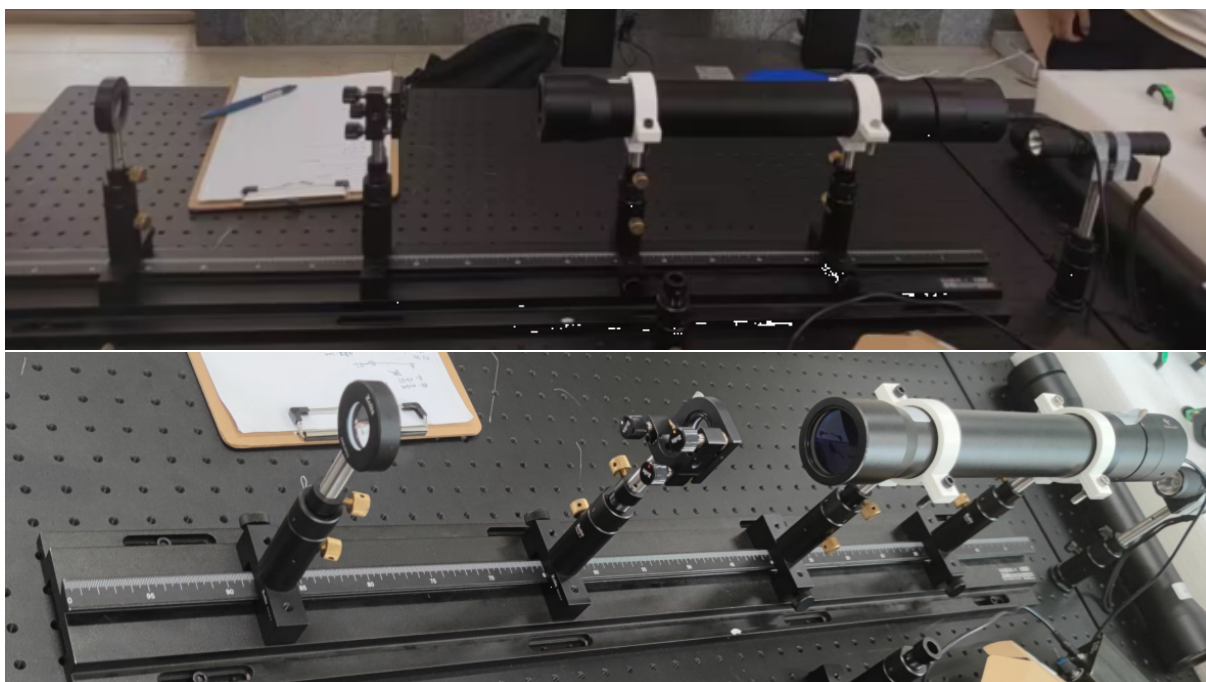


图 18: 搭建的光路示意图

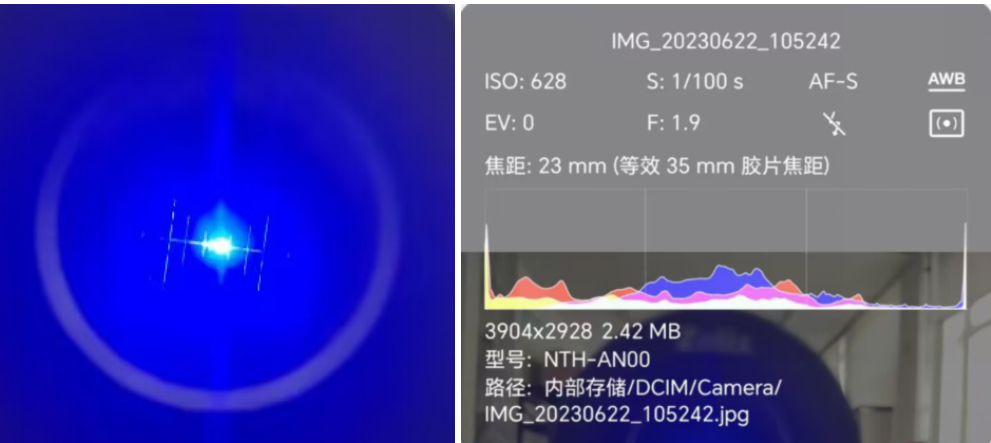


图 19: 成像照片以及照相机相机有光信息

经过计算可得最后有效放大倍率约为 2.51

6 小组名单和分工

姓名	学号	分工
2021251124	古翱翔	设计仿真，实验报告撰写修改，实验
2021251101	姜子轩	仿真实验优化，报告撰写，实验
2021251102	谭钦月	实验数据处理，实验报告撰写，实验报告校对
2021251104	卢浩宇	实验，实验报告撰写
2021251105	许欣茹	实验光路搭建，实验报告撰写，实验报告校对

表 8: 小组名单

7 总结与预期

在软件方面，我们小组学习了如何使用 zemax 的界面和功能，如何输入系统的参数和约束，如何进行光线追迹和优化，如何查看系统的像差图和点扩散函数等。

我们小组学习了如何根据设计的目标和要求，灵活地选择和组合不同类型的透镜，如何利用软件的优化功能来改善系统的性能，如何根据实验的结果和反馈来修改和完善设计方案等。

我们小组感受到了光学是一门既简单又复杂的科学，它有着严格的数学基础和物理规律，也有着多样的现象和应用。例如，在设计望远镜时，我们不仅要考虑到透镜的形状和材料，还要考虑到光源的波长和强度，空气的折射率和湿度，透镜之间的距离和角度等多个因素。而在实验中，我们还要面对各种误差和干扰，如温度变化、灰尘污染、振动噪声等。因此，我们需要不断地学习和实践，才能掌握光学的知识和技能。

预期效果：虚像的视角比物的视角增大很多，能更清晰地看到远处的物体，并感觉物体被拉近放大了。目镜物镜都使用双胶合透镜，选取玻璃 GCL-010606,GCL-010631，用 Zmax，调节镜片之间的距离，视场角，入瞳直径等参数，像差图中 3 条线相交，点列图符合要求，通过强色散玻璃与弱色散玻璃组合，使色散相互补偿，最后消除色差。

结果：预期放大倍数为 2.67，通过光路搭建，实验结果符合要求。

8 附录（彩色打印实验图）

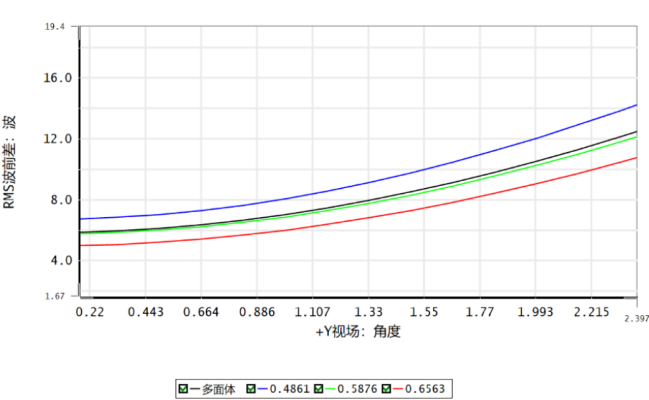


图 10: RMS-视场

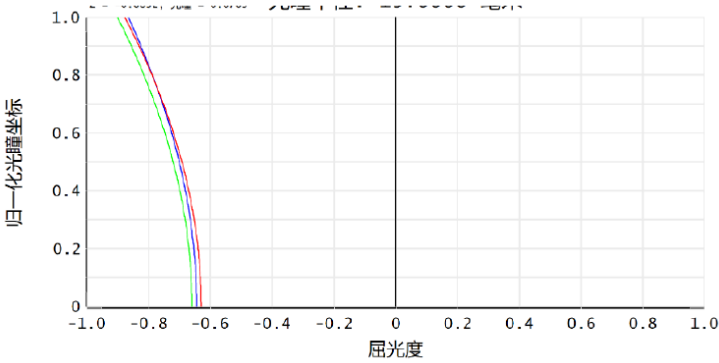
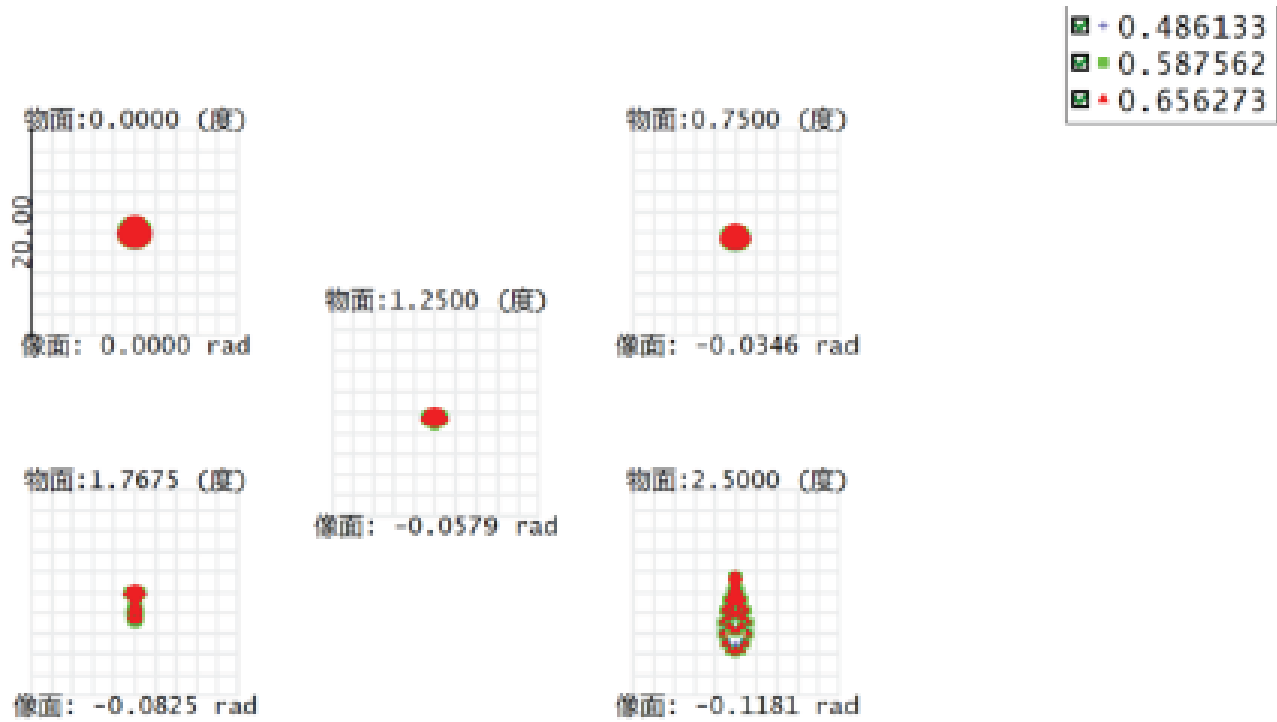


图 11: 未校正的轴向像差



12: 像面

点列图						Zenax Zenax OpticStudio 19.4	
2023/7/1 单位是 mm。图例对应于波长 视场 : 1 2 3 4 5						消色差开普勒望远镜_1.ZMX 1的结构1	
RMS半径 :	0.996	0.826	0.709	1.063	2.273		
IEO半径 :	1.238	1.414	1.235	2.948	5.824		
圈数 :	20	参考 : 主光线					

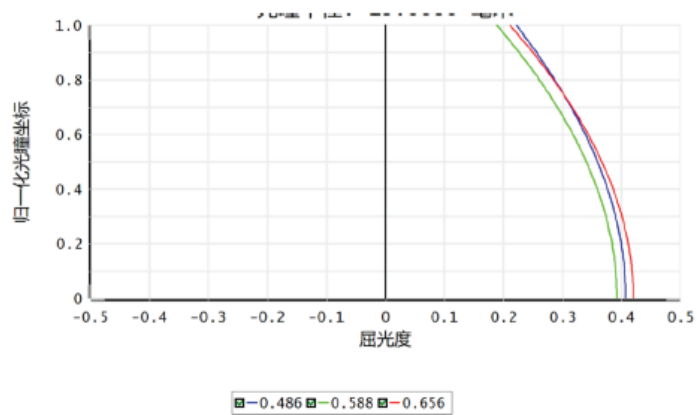


图 15: 优化后轴向色差示意图

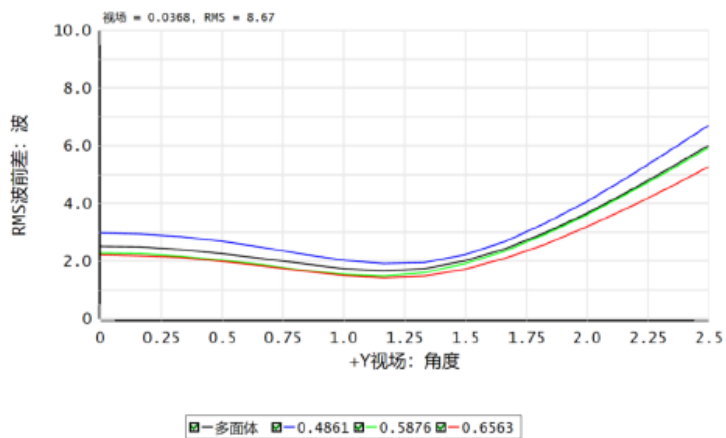


图 16: 优化后 RMS 示意图

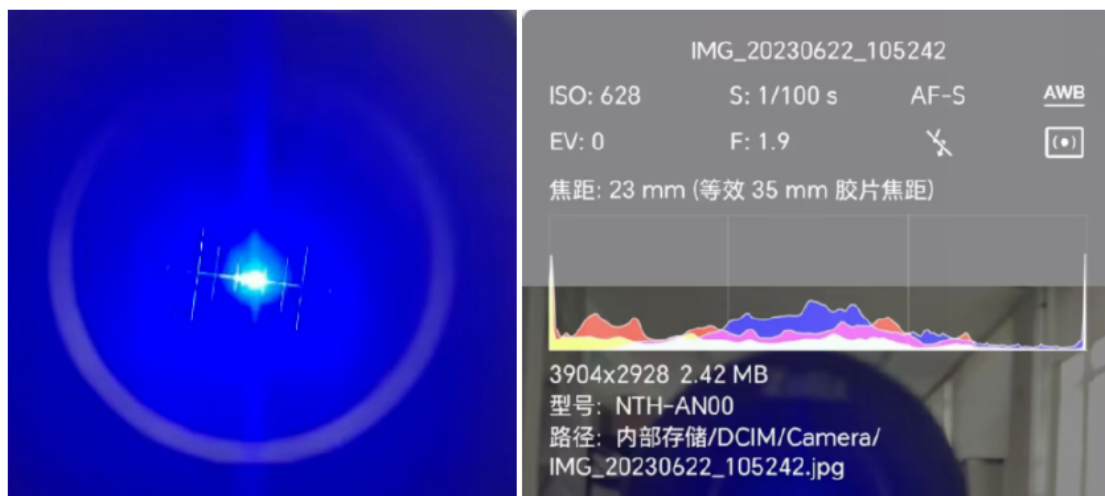


图 19: 成像照片以及照相机有光信息

许欣茹
谭钦月
姜子轩
卢浩宇
古翔羽