
目 录

第一章 ZEMAX 软件简介	1
1.1 简介	1
1.2 用户界面	1
1.3 主视窗的操作（Main Windows Operations）	2
1.4 光学系统的建立	3
1.4.1 设计要求	3
1.4.2 初始结构	3
1.4.3 其他光学特性参数输入方法	4
1.4.4 ZEMAX 中像质评价方法	9
第二章 ZEMAX 优化与操作符	21
2.1 Merit Function（评价函数）的构成要素	21
2.2 评价函数的“默认”（缺省）构成方法	21
2.3 修改成自定义评价函数法	24
第三章 像差设计在 ZEMAX 中的实现	31
3.1 Default Merit Function 和现有像差控制符的局限性	32
3.1.1 轴上点的像差操作符的局限性	32
3.1.2 轴外物点的像差操作符的局限性	32
3.2 常见像差控制在评价函数中的实现	33
3.2.1 轴上球差、色差的控制操作符	33
3.2.2 轴外初级像差的控制操作符	34
3.2.3 轴外物点视场孔径高级像差的定义及其控制操作符	38
3.3 像差设计举例	39
第四章 像差设计实例	49
4.1 望远镜物镜或准直物镜的设计	49

第一章 ZEMAX 软件简介

1.1 简介

ZEMAX Optical Design Program (ZEMAX) 是由美国 ZeMaX Development Corporation 公司开发的专用光学设计软件包，软件逐步升级，我们使用的版本是 2007。

ZEMAX 是 Windows 平台上的视窗式的用户界面，操作习惯和快捷键风格如同 Windows。

1.2 用户界面

ZEMAX 的视窗类型，和 Windows 的基本一致，打开不同的视窗可以执行操作不同的任务，可分为：

◆ 主视窗 (Main Window)

ZEMAX 启动以后，进入主视窗 (图 1.1)。主视窗顶端有标题栏 (title bar)、菜单栏 (menu bar) 和工具栏 (tools bar)。

◆ 编辑视窗 (Editor Window)

ZEMAX 中有 6 种不同的编辑器 (Editors)：即镜头数据编辑器 (Lens Data Editor)，评价函数编辑器 (Merit Function Editor)、多重组态编辑器 (Multi-configuration Editor)、公差数据编辑器 (Tolerance Data Editor)、用于补充光学面的附加数据编辑器 (Extra Data Editor)、以及非序列元件编辑器 (Non-sequential Components Editor)。

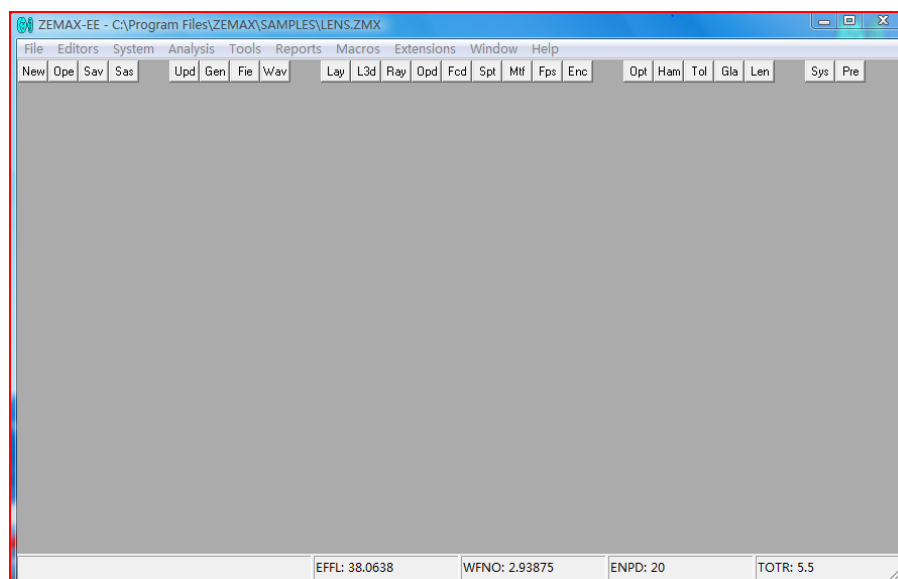


图 1.1 ZEMAX 主视窗界面

◆ 图形视窗 (Graphic Window)

最常用的有草图 (Layout)、扇形图 (Ray fans)、调制传递函数 (MTF Plots) 图等。

◆ 文本视窗 (Text Windows)

设计的文字资料, 如详细数据 (Prescription Data)、像差数据等显示在文本视窗中。

◆ 对话框 (Dialogs)

固定大小, 在过程中跳出来的视窗 (鼠标拖曳不能改变大小)。用于定义或更新视场 (Fields)、波长 (Wavelengths)、孔径 (Apertures)、面型 (Surface types) 等。

1.3 主视窗的操作 (Main Windows Operations)

主视窗在执行 ZEMAX 后显示出来, 可以用鼠标拖动改变大小, 如图 1.1 所示。上部有标题栏、菜单栏、快捷按钮。底部状态栏中显示当前镜头系统的焦距 (EFFL)、F 数 (WFNO)、入瞳直径 (ENPD)、系统总长 (TOTR)。

主视窗中的快捷按钮和状态栏中内容可以自定义, 菜单栏中有:

◆ 文件 (File)

展开后有文件的打开 (Open), 新建 (New), 存储 (Save), 另存为 (Save as) 等, 偏好 (Preference) 可以修改文字大小, 快捷按钮和状态栏中的内容。

◆ 编辑器 (Editors)

栏中包括 ZEMAX 中所有编辑器命令, 展开后可打开 Lens data editor, Merit function editor。

◆ 系统 (System)

定义或更新光学系统的光学特性数据, 例如相对孔径、视场和选取的工作波长等。

◆ 分析 (Analysis)

它是 ZEMAX 中的非常重要的菜单之一, 是用来进行像质评价和分析的主要工具, 对于其中的每一项的数据的含义, 单位要很好地理解。主要有: Fans 中的球差 (Ray aberration), 点列图 (Spot diagrams)、调制传递函数 (MTF)、点扩散函数 (PSF)、波像差 (Wavefront)、圆内能量集中度 (Encircled Energy); 杂项 (Miscellaneous) 中的场曲与畸变 (Field Curv/Dist)、轴向球差 (Longitudinal aberration) 和垂轴色差 (Lateral Color)。

◆ 工具 (Tools)

也是 ZEMAX 中的非常重要的菜单之一, 分成七块: 第一块用来进行光学镜头的局部优化 (Optimization)、全局优化 (Global / Search / Hammer Optimization) 等; 第二块分析镜头的公差, 计算传递函数的点列图, 波差等变化量表。第三块是材料选择, 有察勘玻璃库或向库中新增添或删除玻璃条目, 寻找简单的透镜数据并插入到透镜数据编辑器中。第四块是镀膜模型。

第五块是系统中镜头的孔径的定义，可以与渐晕系数配合共同使用。第六块主要用来整体设计(1)按焦距或放大率缩放当前系统；(2)在当前系统中加入或删除折转发射镜。第七块以后讨论。

◆ 报告 (Report)

形成镜头设计结果的报告，可以作为每一个光学面的形成报告 (Surface data)；也能为镜头系统形成高斯参数或光学特性参数的报告 (System data)；还可以给出设计结果的详细数据报告 (Prescription data)。

◆ 宏编程 (Macros)

执行已经编译好的宏程序。宏程序的编程过程：(1) 使用一般的文本编辑器或使用 ZEMAX 自身的编辑功能创建扩展名为 “*.ZPL” 文件，该文件置于 ZEMAX 目录下的 Macros 目录中；(2) 使用 ZEMAX 提供的命名或函数库进行程序编写；(3) 用 Macros 菜单下的 “Run/Edit Zpl Macros...” 执行宏程序。宏程序可以提取光线追迹数据、像质指标等，可以定义新的优化设计用的操作符。执行时，宏程序作用的对象是当前显示的镜头系统。

◆ 外部程序接口 (Extensions)

ZEMAX 环境中，使用该接口可以执行外部扩展名为 “*.EXE” 的执行程序，用来与 ZEMAX 交换数据，或 ZPL 宏不能完成的功能。外部程序可以用 C 语言等编程工具完成。

◆ 视窗 (Windows) 与帮助 (Help) 菜单

1.4 光学系统的建立

1.4.1 设计要求

如要设计的系统要求： $f' = 200\text{ mm}$ ，视场角 $2\omega = 30^\circ$ ， $D/f' = 1/10$ 。物距为：(1) 物距位于有限远，近轴放大率为 1；(2) 物距位于无限远。

1.4.2 初始结构

1. 选取方法

初始结构选取方法有二，一是从国内外的光学设计手册，专利，镜头数据库中选取；如果手中没有以上资源，则需进行计算，找出满足光焦度，视场等光学特性要求得雏形，来作为初始结构。下面以第二种方法为例，建立起满足特性的初始结构。

2. 计算建立初始结构

由总光焦度和视场要求：至少要有两个组份构成，有总光焦度

$$\Phi = \Phi_F + \Phi_B - d\Phi_F\Phi_B \quad (1.1)$$

设两组分光焦度相等，即 $\Phi_F = \Phi_B$ ，则 (1.1) 式变为

$$\Phi = 2\Phi_F - d\Phi_F^2 \quad (1.2)$$

式 (1.2) 中 Φ 为已知量， Φ_F 为未知量，解二次方程可得：

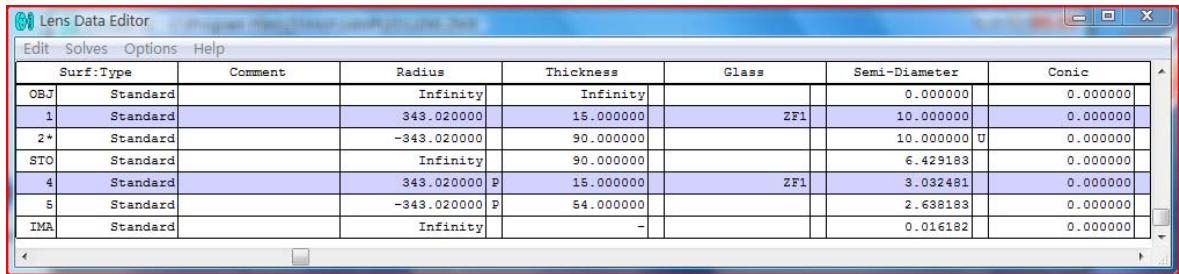
$$\Phi_F = \frac{1}{d} \left[1 \pm \sqrt{1 - d\Phi} \right] \quad (1.3)$$

如果使用双凸透镜，且两个凸面曲率半径大小相等，则曲率半径为：

$$R_F = 2 \frac{(n-1)}{\Phi_F} \quad (1.4)$$

代入设计要求，选择透镜材料为 ZF1 ($n_d=1.64767$, $v_d=33.87$)，工作波长为 $\lambda=0.55 \mu m$ ，则初始结构在 ZEMAX 中的数据为：

表 1.1 例题的初始结构参数



	Surf.	Type	Comment	Radius	Thickness	Glass	Semi-Diameter	Conic
	OBJ	Standard		Infinity	Infinity		0.000000	0.000000
	1	Standard		343.020000	15.000000	ZF1	10.000000	0.000000
	2*	Standard		-343.020000	90.000000		10.000000	0.000000
	STO	Standard		Infinity	90.000000		6.429183	0.000000
	4	Standard		343.020000	15.000000	ZF1	3.032481	0.000000
	5	Standard		-343.020000	54.000000		2.638183	0.000000
	IMA	Standard		Infinity	-		0.016182	0.000000

1.4.3 其他光学特性参数输入方法

1. General 输入相对孔径

General 功能可以由“System”→“General...”选择，还可以通过桌面上“Gen”快捷键来打开，General 对话框如图 1.2 所示。

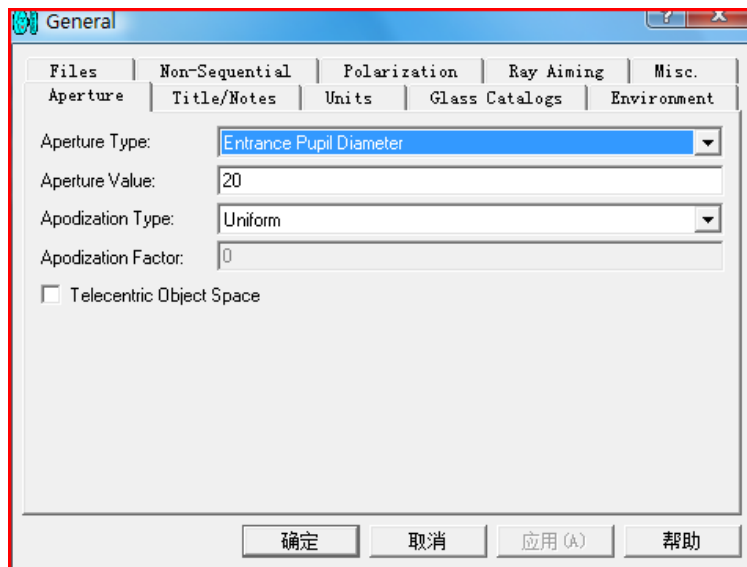


图 1.2 General 对话框

由图 1.2 可以看出, General 对话框中具有 Environment, Polarization, Misc., Non-Sequential, Aperture, Title/Notes, Glass Catalogs, Ray Aiming 等项。

相对孔径的定义在 Aperture 中设置。最常用的选项解释如下:

A. Aperture

Aperture Type 用于定义相对孔径, 即轴上物点的光束大小。定义的种类有:

(1) Entrance Pupil Diameter (入瞳直径)

当物体位于无限远时, 可以用它来定义相对孔径, 此时的 Aper Value 中输入具体的入瞳直径数值, 选择 Lens Units 为 Millimeter (毫米)。

(2) Image Space F/# (像方 F 数)

无论物体位于无限远还是有限远, 都可以用像方 F 数来定义相对孔径。其物理意义是“近轴有效焦距 (EFL) / 入瞳直径”, 此时在 Aper Value 中输入 F 数。

(3) Object Space Numerical Aperture (物方数值孔径)

当物体位于有限远, 可被用来定义相对孔径, 其含义为 $N.A. = n \sin(\theta)$, n 为物方介质折射率, θ 为高斯边缘光线孔径角, 如图 1.3 所示。

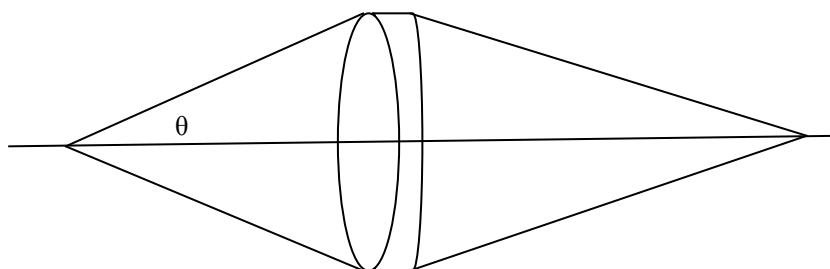


图 1.3 Object Space N.A. 示意图

在 Aper Value 中输入 N.A.值。

(4) Float by Stop Size (由光阑大小决定)

这是定义轴上物点光束孔径的另一种方法, 由 Lens data Editor 中光阑 (Stop) 面的“Semi-Diameter”大小来决定, 此时“Lens Data Editor”中的光阑大小值右边显示“U”, 表示 Stop Surface 的孔径被用户固定, 无法给出 Aperture, 数值输入栏则自动变暗不能被操作。

(5) Paraxial Working F/# (近轴工作 F 数)

定义式为:

$$F - number = \frac{1}{2n' \tan \theta} \quad (1.5)$$

式中 n' 为系统像方折射率, θ 为高斯边缘像方光线孔径角。在计算 θ 过程中, 认为系统无像差, 按照理想系统的边缘光线追迹方法。在 Aper Value 中输入 F 数, 注意前面的 Image Space F/# 区别。

(6) Object Cone Angle (物方锥角)

亦物方孔径角。当物体位于有限远，可用轴上物点发出的边缘光线来定义光束孔径，以物空间边缘光线的半角，即图 1.4 中的 U 来定义，单位“度”，可以大于 90° 。

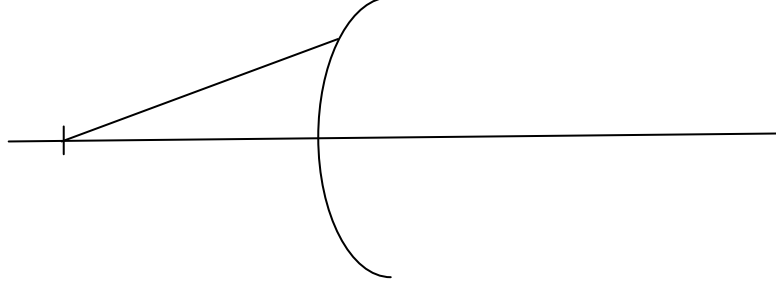


图 1.4 Object Cone Angle 定义示意图

B. General 对话框中其他功能

(1) Apodization Type (定义光瞳上光强分布)

- 选项有： a) None 表示光瞳被均匀照明；
b) Gaussian 表示光瞳上光振幅扰动为高斯型，即：

$$A(\rho) = e^{-G\rho^2} \quad (1.6)$$

其中 ρ 为光瞳归一化极坐标， G 为切趾 (Apodization) 因子，如果 $G=0$ ，表示光瞳被均匀照明， G 一般小于 40。

- c) Tangential 表示正切型光瞳振幅分布，即：

$$I(r) = \frac{z^3}{(z^2 + r^2)^{3/2}} \quad (1.7)$$

其中 Z 为光瞳面上面元到点光源的距离， r 为光瞳面上的位置坐标 (离开光轴的距离)，如图 1.5 所示，光瞳中心 (轴上) 为 0，最大值一般被归一化为单位 1。

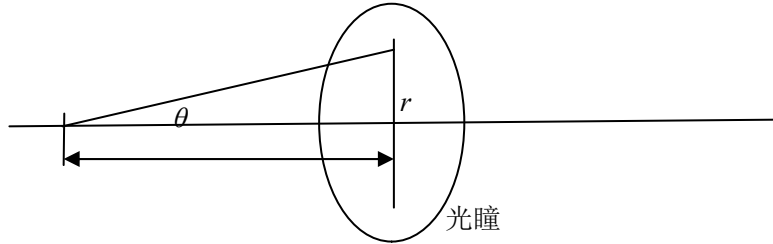


图 1.5 正切型照明示意图

光振幅 $A(\rho) = \sqrt{I(r)}$ ，如 r 采用归一化的坐标 $r = \rho H$ ，有 $0 < \rho < 1$ ， H 为光瞳半径。此时 $A(\rho)$ 为 (1.8)，其中 $\tan\theta = \rho H / Z$

$$A(\rho) = \frac{1}{[1 + (\rho \tan \theta)^2]^{3/4}} \quad (1.8)$$

(2) Glass Catalogs (玻璃库)

ZEMAX 提供了德国的 Schott、日本 Hoya、Ohara、美国 Corning 等玻璃生产厂商的玻璃库，还有红外、塑料材料 (PMMA)、双折射晶体材料等内建玻璃库。

如光学设计中，要选用中国玻璃库，有两种方法：

- a) 使用 Len Data Editor 视窗中 Glass 栏的 Model 功能，输入 v_d , n_d 即可；
- b) 导入中国玻璃库 Chinaglass 库文件到玻璃库数据库中，直接调用。

(3) Ray Aiming

适用于大视场镜头设计中，确保主光线通过孔径光阑的中心。选项有：

◆ No Ray Aiming

这是 ZEMAX 预设选项，表示不进行光线瞄准，此时 ZEMAX 认为光瞳无像差。对于中等视场的光学系统，可以用此项。但是对于大相对孔径或大视场光学系统，会存在严重的光阑像差，光阑像差的表现有：(a) 光瞳位置随视场值变化；(b) 光瞳边缘发生变形。

◆ Aim to aberrated (real) stop height

对于大视场光学系统，通常用此选项，用于消除光阑像差。含义是：瞄准有像差时的孔径光阑高度。选用该选项后，ZEMAX 计算像差，孔径光阑大小有来自物面中心的主波长边缘光线在光阑面上的交点决定。然后适用迭代法追迹光线，找出一根经过孔径光阑中心的光线（此时不一定经过入瞳或出瞳中心，但经过像差校正后，也会同时经过入瞳、出瞳的中心），作为主光线。

◆ Aim to unaberrated (paraxial) stop height

该选项与前一选项的明显区别，在于该项假设镜头系统没有像差，使用理想情况下的近光线追迹来瞄准光阑中心，优点是计算时间短。

2. Fields 对话框中定义视场

通过 System → Fields ... 可以打开视场定义对话框，如图 1.6，首先给出了视场种类定义四个选项：角度（视场角）、物高、近轴像高和实际像高。其中视场角单位为度，线视场的单位为 ZEMAX 选择的 Lens Units，一般为毫米 (mm)。

接下来，给出最多为 12 的视场序号，即最多可定义 12 个视场，X-Field 与 Y-Field 同时选用，适用于非旋转对称光学系统；对于旋转对称系统，一般仅在 Y-Field 栏中输入数据，定义子午面内的视场。Weight 用于定义各个视场的权重。

对于大视场光学系统，一般要考虑渐晕现象，有渐晕系数来描述。ZEMAX 提供了 4 个参数，即 VDX、VDY、VCX 和 VCY 来描述渐晕现象，其中 VDX、VDY 用于定义光瞳中心位置的 x,y 偏心；VCX、VCY 用来定义渐晕因子。当 VDX=VDY=VCX=VCY=0，表示无渐晕现象，对于旋转对称系统，仅使用 VDY 与 VCY 即可。

如轴上物点光瞳归一化坐标为 P_x 、 P_y ，有渐晕时轴外光瞳归一化坐标为：

$$\begin{aligned} P'_x &= VDX + P_x(1-VCX) \\ P'_y &= VDY + P_y(1-VCY) \end{aligned} \quad (1.9)$$

Field Data

☒ Angle (Deg) ☐ Paraxial Image Height
☐ Object Height ☐ Real Image Height

Use	X-Field	Y-Field	Weight	VDX	VDY	VCX	VCY	VAN
☒ 1	0	0	1.0000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
☐ 2	0	0	1.0000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
☐ 3	0	0	1.0000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
☐ 4	0	0	1.0000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
☐ 5	0	0	1.0000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
☐ 6	0	0	1.0000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
☐ 7	0	0	1.0000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
☐ 8	0	0	1.0000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
☐ 9	0	0	1.0000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
☐ 10	0	0	1.0000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
☐ 11	0	0	1.0000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
☐ 12	0	0	1.0000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000

OK Cancel Sort Help
 Set Vig Clr Vig Save Load

图 1.6 Fields 定义对话框

例如，图 1.7 表示了旋转对称光学系统在偏心 $VDY=0.3$ ，渐晕系数 $VCY=1-\frac{o'a}{H}$ 的渐晕光瞳，其中 H 为轴上物点光瞳半径， $o'a$ 表示轴外物点光瞳渐晕时的子午面上的半径，此时， $VDX=0$ ， $VDY=0.3$ ， $VCX=0$ ， $VCY=1-\frac{o'a}{H}$ 。

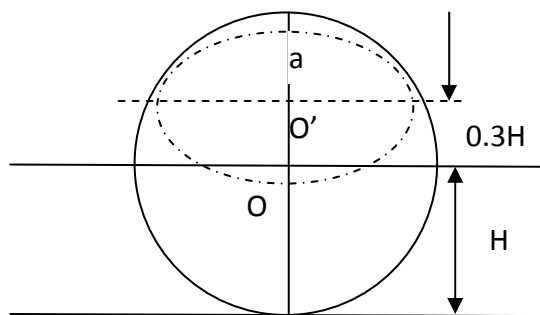


图 1.7 渐晕定义示意图

考虑渐晕后，优点为：（a）可以缩小透镜的口径，节省加工成本，（b）可以把引起严重轴外像差的光线去除掉（即选择光阑位置消除轴外像差）。

图 1.6 中底部“Set Vig”按钮，由 ZEMAX 可自动设置渐晕系数。在两种状态下可以自动设置渐晕系数：

- （a）当 Lens data Editors 中，某一光学面的通光直径固定；
- （b）使用 Tools → Convert Semi-Diameters to Floating Apertures。

Save 与 Load 对已经建好的视场数据，可以完成存储和调用，文件扩展名为“*.Fld”。

3. Wavelengths 定义镜头工作波长

通过桌面上的快捷键“Wav”或“System → Wavelengths”打开“Wavelengths”对话框，可以定义最多 12 个波长（单位：微米 μm ）。典型波长的数据已经存储在对话框中，通过“Select”勾选，其中“Primary”定义主波长，用于考查镜头系统的单色像差。

4. 前例中的光学特性数据的输入方法

(a) 定义近轴工作 F 数（Paraxial working F-number）=10，方法：逐层选择“System → General ... → Aperture → Paraxial working F-number”，在“Aper Value”后面的数值框中输入“10”。

(b) 定义半视场“0° , 10.5° , 15° ”，逐层选择“System → Fields... → ”对话框中，选择 1, 2, 3 视场序号，输入“Y-Field”分别为“0° , 10.5° , 15° ”。不定义“权重”与“渐晕因子”等。

(c) 对有限远物距 1000 mm，在“Lens Data Editors”中“Object”的“Thickness”输入 1000，目前镜头系统的近轴放大率可能不为“-1.0”，输入恰当的有限远物距后，可经过优化设计，改变物距或改变结构参数以保证近轴放大率要求。

1.4.4 ZEMAX 中像质评价方法

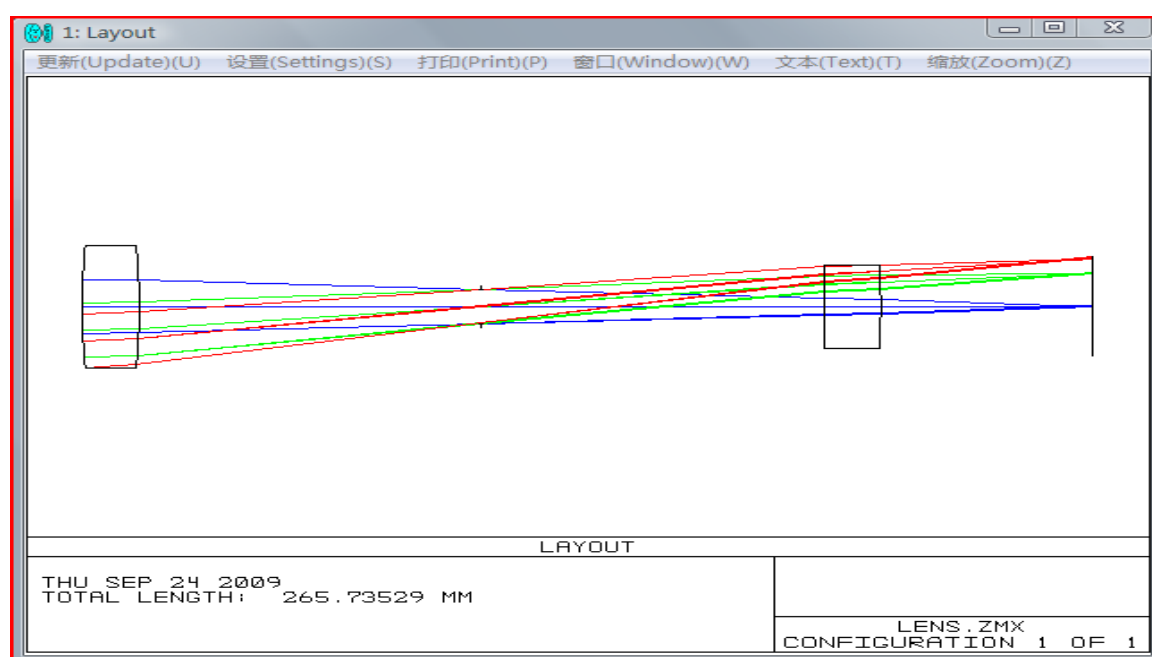


图 1.8 光学系统草图

建立了初始结构如表 1.1 的镜头数据以及光学特性参数以后，可以用“Analysis → Layout → 3D Layout”画出该结构的光学系统草图，如图 1.8 所示，由“3D Layout”可以检查输入数据是否存在错误，是否与预想的结构形式一样。然后，可以运用 ZEMAX 的像质评价功能，对初始结构进行评价。当然像质评价功能可以贯穿整个光学设计的中间过程和最终设计环节之中。下面我们选取主要的像质评价指标，来说明指标的具体含义。

1. Fans

光学中的“Fans”，此处意为光扇图，与光学设计中的子午面和弧矢面的光线结构相对应。由任一物点发出的不同孔径高的光线组分别在子午面内和弧矢面内，形成子午扇形光线和弧矢扇形光线组，由这些扇形光线组描述跟像差有关的像质指标，可以统称为“Fans”。因此，Fans描述的是子午与弧矢两个截面内的像差曲线图。共有“Ray Aberration，Optical Path 和 Pupil Aberration”三种：

◆ Ray Aberration

垂轴表示的几何像差曲线。由像质评价技术，独立的几何像差是按几何光线的空间结构来定义。轴上有球差、高级球差两种单色像差；有轴向色差（一般取 0.707 孔径）、色球差、二级光谱三种色差；轴外有子午像差、弧矢像差与主光线像差。子午面与弧矢面单色像差有：场曲、慧差、像散，主光线像差有畸变、垂轴色差。在考虑视场和孔径的高级像差时，种类更加繁多，有沿轴（或轴向）像差，每一种像差反映了几何光线在成像时的空间位置分布，如果镜头系统理想成像，所有的像差必须为零，数据量大，不利于总体掌握成像情况。

几何像差的垂轴标识法，只考虑由一个物点发出的子午面或弧矢面内不同孔径光线，在像面上交点离开主光线交点的变化情况，相当于弥散大小，不去考虑到底是沿轴分量的像差，还是垂轴分量的像差，让我们产生综合的印象。

Ray Aberration 是 Fields 对话框中定义的每一个视场序号，而绘出的像面（XOY 面）上的 X 分量像差（X aberration）和 Y 分量像差（Y aberration）随光线孔径高之间的变化曲线。一般的，X-aberration 用 EX 表示，Y-abberation 用 EY 表示，光线孔径高用 PX、PY 表示。

在子午面（YOZ 面）内，某一物点（视场序号表示）发出不同孔径高的光线，经过镜头系统后，光线均在子午面内，光线坐标中 $PX=0$ ，PY 从 0—1 变化，因此离开主光线在像面上交点的位置表示只有 Y 分量（Y-aberration），X-aberration 均为 0，即 Tan Fan（子午光扇图）只有 Y-aberration，只有 EY~PY 关系曲线图。

在弧矢面（XOZ）内，某一物体发出不同孔径高的光线，此时关系坐标 PX 从 0~1 变化，PY=0，这些光线经过镜头系统后，孔径高绝对值相等的光线对仍以子午面对称，即与像面交点离开主光线交点位置偏差具有 X 分量（X-aberration），也具有 Y 分量（Y-aberration）；且光线对的 X-aberration 大小相等，符号相反，Y-aberration 相等，Sag Fan（弧矢光扇图）即有 EY~PX 曲线，也有 EX~PX 曲线，EY~PX 以 EY 呈轴对称，EX~PX 曲线以原点呈旋转对称。

在旋转对称系统中，轴上物点的子午面与弧矢面相同，所以其 EY~PY 与 EX~PX 曲线完全相同。图 1.9 给出 1.3 节例子物在 1000 mm 初始结构的 Ray aberration 曲线，图中前一对是 0 视场的 Ray aberration 曲线，中间一对是 10.5° 视场的 Ray aberration 曲线，最后一对是 15° 视场角的 Ray aberration 曲线。每一条曲线的横坐标为归一化光瞳坐标，由 -1~1 变化，纵坐标表示几何像差在像面上的弥散情况，其每一格值由图下方给出的 Maximum Scale 确定。该图中，纵轴正半轴大小为 5000 μm ，每一格值为 1000 μm 。所以 0° 视场弥散像差很小，10.5° 视场子午弥散半径近似为 1500 μm ，弧矢弥散半径近似为 800 μm ，15° 视场子午弥散半径近似为 3000

μm ，弧矢弥散半径近似为 $1300\ \mu\text{m}$ 。

由 Ray aberration 图可以看出几何像差存在时的综合弥散情况，还可以看出其他独立几何像差的大小，如由原点处曲线的斜率可以反映轴向像差分量，诸如球差、场曲、离焦的大小，图 1.9 中表明目前初始结构的场曲较大；再如由曲线边缘孔径 (± 1.0) 处的 Y-aberration 之和，能够反映慧差大小；如果工作波长是一光谱段，每一视场的 Ray aberration 曲线中每一幅图有三根曲线，反映波长序号为 1,2,3 的 Ray aberration 数据。这样 Ray aberration 曲线中，1,3 波长的曲线与 EY 轴的交点之差反映垂轴色差的大小。随着视场的变化，可以清楚垂轴色差的变化。

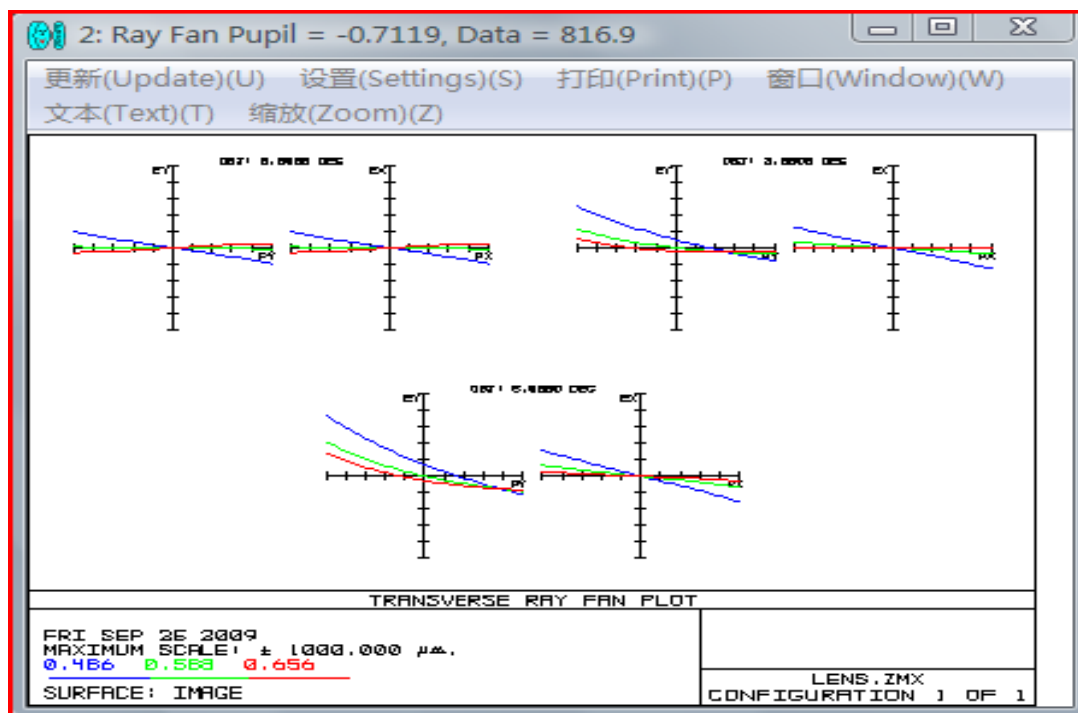


图 1.9 前例 Ray aberration 曲线

如果在 Ray aberration 曲线窗口中，选择 Setting 或在任一位置，右击鼠标，将弹出设置对话框，对话框中选项的含义参见表 1.2。

表 1.2 例题的初始结构参数

选 项	含 义
Plot Scale	绘图比例，输入的数值用于定义纵轴半轴长度，单位： μm ；数值越小，曲线被放大；数值越大，曲线被压缩，0 表示正半轴最大数值自动选定。
Number of Rays	子午或弧矢面主光线两侧追迹的光线数目
Wavelength	波长序号选项，All 表示全选
Field	视场，All 表示全选

Tangential	每一视场左边曲线纵轴像差的选项，有 X-aberration 和 Y-aberration 两种，如果选 X-aberration，纵轴变为 EX，否则 EY
Sagital	每一视场右边曲线纵轴像差的选项，有 X-aberration 和 Y-aberration 两种，如果选 X-aberration，纵轴变为 EX，否则 EY
Use Dashes	选中，曲线以黑白虚线表示
Check apertures	选中，则检查光线是否在每个光学面上的有效通光孔径内
Vignetted Pupil	选中，则横轴 1.0 表示轴上物点的光瞳直径，对大视场光学系统，如存在渐晕，则轴外视场的 Ray aberration 曲线中横轴取值会小于 1.0，能够明显反映渐晕现象；如不选，横轴 1.0 可以表示渐晕时光瞳归一化孔径，取值从 0~1.0，曲线反映不出渐晕现象。此时，0 视场与轴外视场曲线中横轴 1.0 表示绝对孔径长度是不等的

◆ Optical path

显示的光瞳归一化坐标 (PX, PY) 为横轴的光程差曲线，相当于一维波差曲线，纵轴为光程差，以主光线所走过的光程为基准。

◆ Pupil Aberration

反映光瞳像差。表示实际主光线与光瞳面交点，离开高斯主光线与光瞳面交点的距离，一般用占光瞳半径的百分数表示，图 1.10 给出了 1.3 节例物在 1000 mm 处初始结构的光瞳像差曲线，由该图看出，由于物位于子午面内，在子午面内存在明显的光瞳像差，表示轴外光瞳偏心。此时，如不消除光瞳像差，会影响各种轴外像差值的精确计算，如选“System→General...→Ray Aiming→Aiming to aberration (real) stop height”，则可以很好地消除光瞳像差。

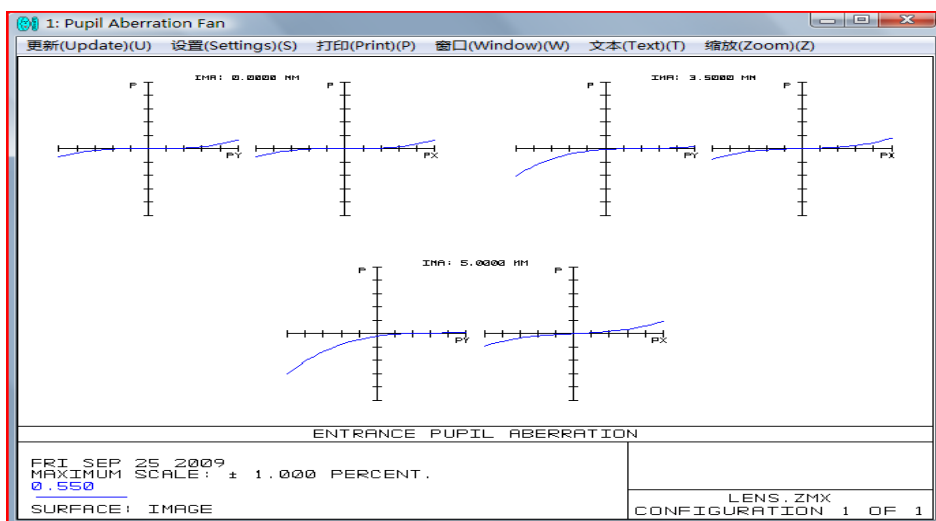


图 1.10 1.3 节中例在 1000mm 处初始结构的 Pupil Aberration

2. Stop Diagrams（几何点列图）

Ray aberration 仅能反映子午、弧矢面内光线造成像的弥散情况，几何点列图则能反映任一物点发出的充满入瞳的光锥，在像面上的交点弥散情况。

几何点列图通常以主光线与像面交点为原点，进行量化计算点列图的弥散情况，ZEMAX在此基础上，还给出以虚拟的“质心”、“平均”为原点的量化点列图。

图 1.11 表示了 1.3 节例子物在 1000mm 处初始结构的像面点列图。使用点列图的评价像质，除了观察点列图形状外，一般还使用两个指标，即，如图 1.11 下方的 RMS Radius 与 GEO Radius，单位一般仍为 μm 。前者表示点列图弥散的实际几何半径。有时如仅有两根光线与像面交点散的厉害，而其他光线分布比较集中，即 RMS Radius 较小，而 GEO Radius 较大，仍认为像质比 RMS Radius 值较大时好一些。

过去在设计使用胶卷的照相物镜时，常用点列图进行像质评价，如果每一视场点列图 RMS Radius 小于 $15\mu\text{m}$ ，则可认为设计中的照相物镜系统已经具有较好的像质。

图 1.11 中给出了三个视场的点列图情况，由点列图的图案及 RMS Radius、Geo Radius 值也可以估算独立几何像差大小，即可判断是什么样的像差影响点列图的渐小。如从图 1.11 中可以明显地看出场曲与像散是该初始结构主要存在的几何像差。

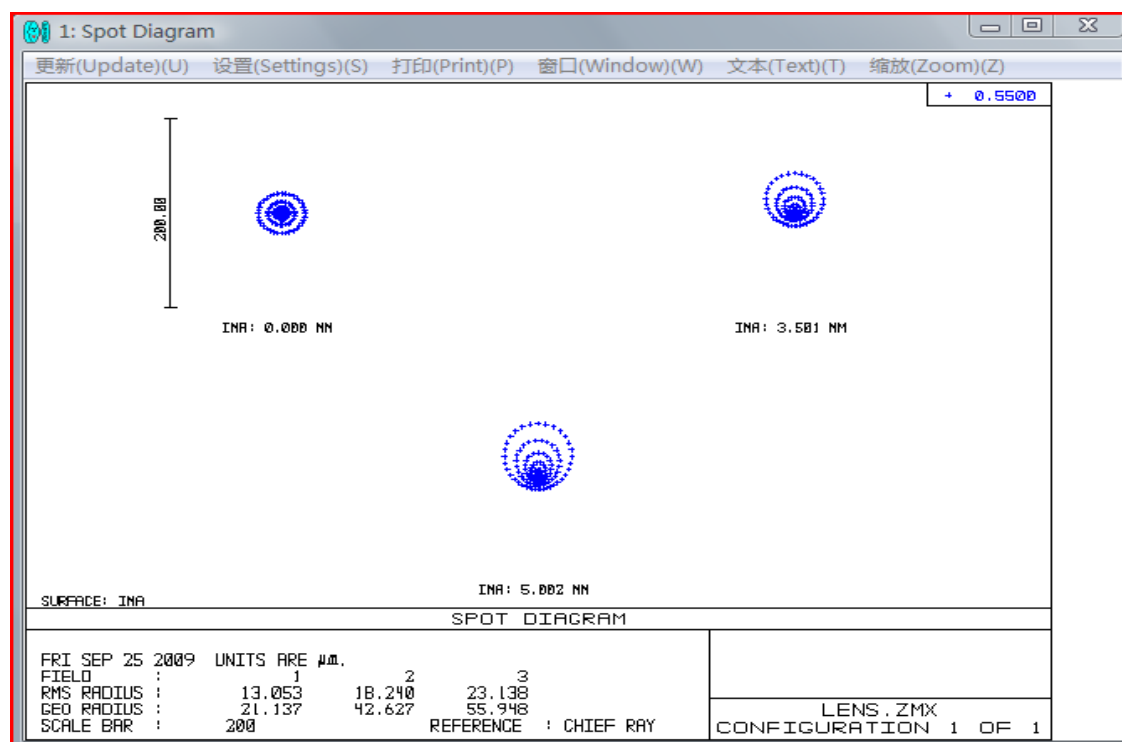


图 1.11 1.3 节例物在 1000mm 处初始结构的点列图

点列图 (Spot Diagrams) 的表现形式有五种：标准点列图 (Standard)、离焦点列图 (Through Focus)、反映视场像高的点列图 (Full Field Spot Diagrams)、随视场与波长变化的点列阵图 (Matrix Spot Diagrams)、随视场与多重结构变化的点列阵图 (Configuration Matrix Spot Diagrams)。其

中常用的是标准点列图。

根据像质评价技术，计算点列图时入瞳上光线的选取有以下几种方法：极径、极角划分的极坐标形式，在 ZEMAX 中称为 hexapolar（六极）；有直角坐标网格划分的方形网格（Square）；ZEMAX 中还提供了基于伪随机方法的颤抖式（dithered）光瞳划分方法。

如在点列图设置（Setting）中的 Surface number 由像面改变成其他光学面序号，此时点列图反映光线与光学面的交点分布，也反映光学面的通光情况；如将 Surface number 设置成光阑面序号，则此时点列图可反映光阑通光面的形状，如轴外光阑面点列图分布为椭圆形状，则表示渐晕现象，图 1.12 给出了这样的点列图。

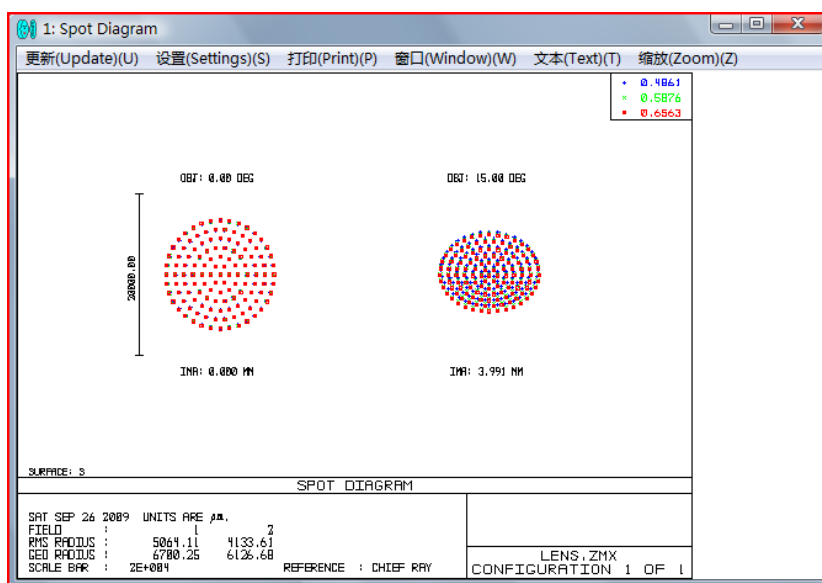


图 1.12 反映渐晕现象的孔径光阑点列图

3. MTF（调制传递函数）

MTF 是目前使用比较普遍的一种像质评价指标，称为调制传递函数。它既与光学系统的像差有关，又与光学系统的衍射效果有关，是光学传递函数（OTF）的模，曲线横轴表示像面上的空间频率，单位： $1/\text{mm}$ ，即每毫米多少线对，纵轴表示对这些黑白细实线物分辨的调制度。

任何一种物信息，都可以细分到点，也可以细分到线，调制传递函数（MTF）的物理意义是：应用傅立叶变换原理与光学系统相干成像理论，计算出镜头对逐渐变细的黑白线对分辨的调制度。

根据计算模型的不同，MTF 分为三类：

- （1）FFT MTF—基于快速傅立叶变换，先计算 PSF（点扩散函数），再由 $\text{PSF} \rightarrow \text{MTF}$ ；
- （2）Huygens MTF—基于惠更斯面包络原理，先计算出瞳面上的光瞳函数，然后把出瞳面细分，看成次级光源，在向像面传递；因此计算惠更斯传函时，要将出瞳面细分网格、也将像面细分网格采样；
- （3）几何 MTF—基于几何点列图，转化成子午面或弧矢面上的线扩散函数，再经傅立叶变换，得到调制传递函数。

以上几种 MTF，都可用于客观评价成像质量，由于计算模型不同，结果出现较小差别，但变化趋势及量值不会差别很大，使用时要注意以下概念的区别：（1）计算速度上看，FFT MTF 最快，Huygens MTF 和 Geometric MTF 速度较慢，但在初始结构像质太差（如波差 $PV > 6\lambda$ ）时，FFT MTF 计算会显示出错，这很正常，此时几何传递函数仍可进行正常计算，只是传函值太低；（2）从网格采样看，FFT MTF 和 Geometric MTF 只需对像面（或物面）空间坐标进行 $2'' \times 2''$ 网格采样，但 Huygens MTF 因计算模型差别，还要增加对出瞳面网格采样，这是导致 Huygens MTF 计算速度变慢的主要原因；（3）FFT MTF 和 Huygens MTF 都能计算出 Surface MTF（即 3D-MTF），但 Geometric MTF 一般只计算子午与弧矢面上 MTF，不提供 Surface MTF。

在使用 MTF 进行像质评价时，要注意以下几个方面问题：（1）对每一种镜头系统，需要物面特征、探测器像素与响应情况，确定评价时的特征频率和对比阈值，确定特征频率处的 MTF 值至少为多少？否则无法确定 MTF 曲线的好坏；截止频率（ ν_c ）跟镜头系统的 F 数及工作波长（ λ ）有关，即 $\nu_c = 1/F\lambda$ ；（2）察看 MTF 数值时，要看多色 MTF 在每一个视场处的子午和弧矢传函曲线，并注意选择适当的离焦量；（3）MTF 值跟波像差、点列图等像质指标一样，只反映成像清晰度，不反映变形，所以要检查物像相似程度，还要再看畸变曲线。

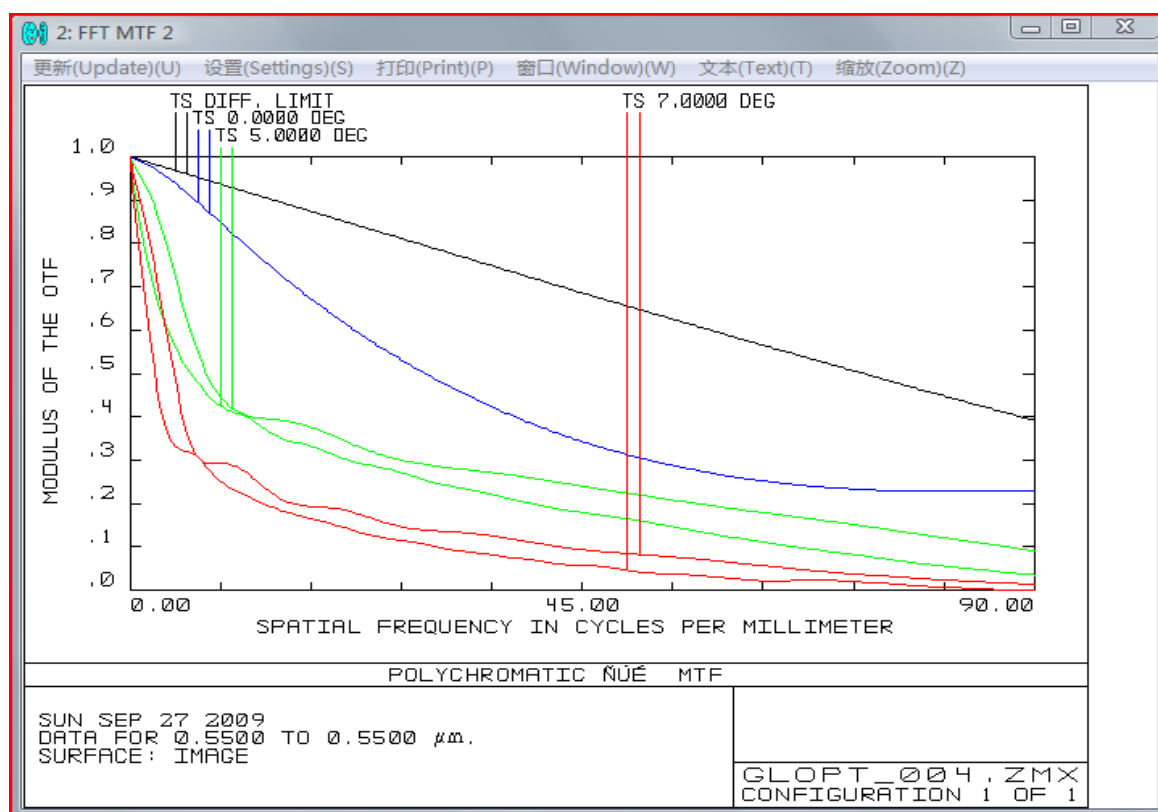


图 1.13 某一投影物镜的复色 MTF 曲线

ZEMAX 在 MTF 曲线计算中，还可以绘制 Through Focus MTF 及 MTF vs Field 曲线，通过查看不同的视场、某一离焦量范围内特征频率处的传递函数值，由此可选择恰当的离焦量。

图 1.13 给出了某一多媒体投影物镜的复色 MTF 曲线。一般情况下，无须查看截止频率处的传函值，因此实际评价像质时，会选择比特征频率稍大一些的最大频率范围，对常规成像镜

头系统，最大频率可选 50/mm，或者 100/mm 左右。图中选择了最大频率为 90/mm。

4. PSF（点扩散函数）

PSF（Point Spread Function）反映点物经过镜头系统后，因像差或衍射在像面上造成的扩散情况，横轴为像面上的线性尺度，纵轴为归一化能量分布。PSF 计算模型也有 FFT 和 Huygens 两种。PSF 一般使用在精细成像质量或小像差系统场合。

5. Wavefront（波像差）

也是一种评价像质的常用指标，可用于小像差光学系统和大像差光学系统，同时因有瑞利判据（波像差小于 $\lambda/4$ 波长，镜头系统成像质量接近理想），使波像差评价像质易被量化，只是对大像差系统时，可将波像差容限取成 2-4 倍的瑞利标准。

波像差和视场相关，由一个视场物点发出充满入瞳面的光线，相当于一个球面波入射，经过镜头系统后，出射波面因像差的存在发生变形，表示存在波像差。因此，对于一个视场，某一波长下，计算不像差时，要对入瞳面进行网格点采样，一般采样密度为 $2'' \times 2''$ ，由光线追迹计算每一条光线到达像面时走过的光程差，一般取主波长（Primary Wavelength）主光线所走过的光程作为参考光程，相当于取主光线跟像面的交点，作为参考球面的球心，并使参考球面经过出瞳中心。

显示波像差图时，可通过“Analysis → wavefront → Wavefront Map”给出某一个视场、某一波长下的三维波面图，如须查看其他波长、视场下的波像差图，则要使用如表 1.3 所示的设置。

ZEMAX 对波像差还提供了 Interferogram 和 Foucault Analysis 的菜单选项，前者可以为两束光相干以干涉图表示，尤其适用于分析干涉系统，后者用于产生 Foucault 刀口阴影图。

6. Miscellaneous

Miscellaneous 意为“其他”或“杂项”，归属那些不太重要或不入大类的功能项。Miscellaneous 中放置几何像差的分析功能，按先后顺序，有细光束场曲与畸变（Field Curvature/Distortion）、轴向球差（Longitudinal Aberration）、垂轴色差（Lateral Color）。

◆ Field Curvature / Distortion

细光束场曲与畸变曲线之所以称为细光束场曲，是因为场曲曲线没有跟光束孔径有关。图 1.14 给出了 1.3 节例物在 1000mm 处初始结构的场曲与畸变，图中左边为细光束子午、弧矢场曲，如果工作波长有多个，则图中会给出每一个波长的细光束子午、弧矢场曲；右边为归一化畸变。图 1.14 两个曲线图的纵轴都是归一化视场，左图横轴为场曲，单位为毫米，右图横轴为百分畸变。还揭示了像散信息。

细光束场曲反映了不同视场点的细光束像点离开像面的位置变化，初级细光束场曲跟视场的平方成正比，其对成像的影响，是使一平面物体成一弯曲像面。细光束像散反映了子午和弧矢细光束像点（或子午与弧矢弯曲像面）的不重合而分开的轴向距离。

表 1.3 Wavefront Map 对应的设置选项

选 项	含 义
Sampling	选择光瞳面采样密度，得到波像差的 X,Y 坐标点阵
Rotation	旋转波面显示的选项
Scale	显示比例选项，一般情况下不作放大与缩小，取为 1，如取成小于 1，则波像差高度方向被缩小，如取成大于 1 的数，则波像差高度方向被放大。
Wavelength	工作波长序号选项，只有单一波长序号选项，而无“ALL”选项，表示不能计算复色波像差。
Field	波像差对应的视场序号选项
Reference to Primary	复选框，对应于参考球面的选取，选中则表示用主波长参考球面，不选，不用主波长参考球面。对轴上物点，选与不选结果不一样，不选可体现垂轴色差的影响。
Use Exit Pupil Shape	复选框，对应于光瞳形状的选取，如果存在光瞳像差，则选与不选结果不一样，否则光瞳形状像差被消除时，选中，选与不选无差别。
Show as	波像差图的显示形式选项

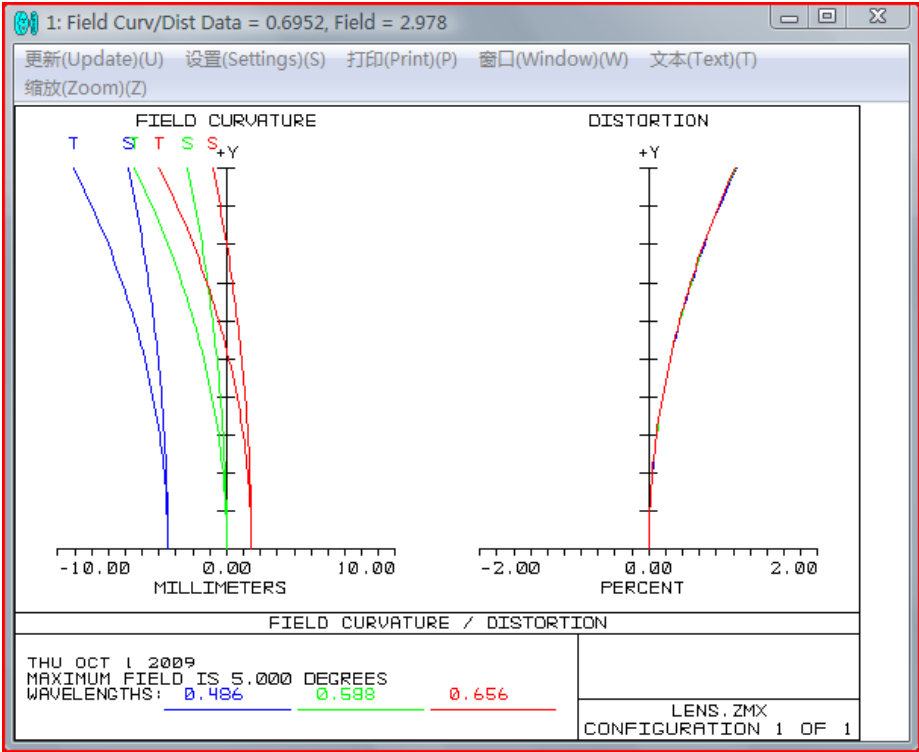


图 1.14 1.3 例物在 1000mm 处场曲与畸变曲线

畸变属于主光线像差，反映物像的相似程度，如果低于 1%，则认为物像几乎完全相似。

畸变的基本定义，是某一视场主波长时的主光线与像面交点离开理想像点的垂轴距离。实际使用时，据镜头的功用还会衍生出其他计算形式，主要有（1）标准畸变；（2）F-Theta 畸变；（3）校准（calibrated）畸变。

标准畸变，采用常规的定义如

$$Distortion = \frac{y_{chief} - y_{ref}}{y_{ref}} \times 100\% \quad (1.10)$$

其中 y_{chief} 为主光线与像面的交点高度， y_{ref} 为理想像高，如物在无穷远，且视场角为 θ ，则 $y_{ref} = f' \tan \theta$ ， f' 为镜头系统焦距。

F-Theta 畸变，俗称 $f\theta$ 畸变，为扫描仪或傅立叶变换透镜专用的畸变形式，因为这一类光学系统，要求理想像高跟视场（或扫描）角成正比，即 $y_{ref} = f'\theta$ ，此时

$$F-Theta Distortion = \frac{y_{chief} - f'\theta}{f'\theta} \times 100\% \quad (1.11)$$

Calibrated 畸变，即校准畸变或标定畸变。一般情况， $y_{ref} = f' \tan \theta \neq f'\theta$ ，但可以用 $y_{ref} = f'\theta$ 来拟和 $y_{ref} = f' \tan \theta$ ，此时得到 f^* ，称之为最佳拟和焦距。

$$Calibrated Distortion = \frac{y_{chief} - f^*\theta}{f^*\theta} \times 100\% \quad (1.12)$$

实际上，不论是应用（1.11）还是（1.12）式计算畸变，只要把每一视场的畸变校正到公差范围之内， y_{chief} 一定与扫描角或视场角 θ 成正比。表 1.4 给出场曲和畸变曲线有关的选项。

表 1.4 Field Curvature / Distortion 的设置选项

选 项	含 义
Max Curvature	曲线中场曲坐标最大值设置
Max Distortion	曲线中畸变坐标最大值设置
Wavelength	工作波长序号选择，可以选“All”
Use Dashes	复选框，选中，表示用虚线
Distortion	畸变计算种类选项，有 Standard, F-Theta 和 Calibrated 畸变
Do X-Scan	复选框，适用于非旋转对称系统。选中沿 X 方向视场计算，不选，沿 Y 方向视场计算。如果只定义了 Y 视场，则不选。
Ignore VignettingFactors	复选框，选中，则忽略渐晕因子。如轴外视场有渐晕，则不选选与不选无差别。

◆ Longitudinal Aberration

所有工作波长的轴向球差曲线，以 Primary 波长的像面为计算基准，即通常所说的球差曲线。图 1.15 给出了某投影透镜的轴向球差曲线。曲线左边一根是主波长的球差曲线，中间一根为 C 光线球差曲线。右边一根为 F 光球差曲线。

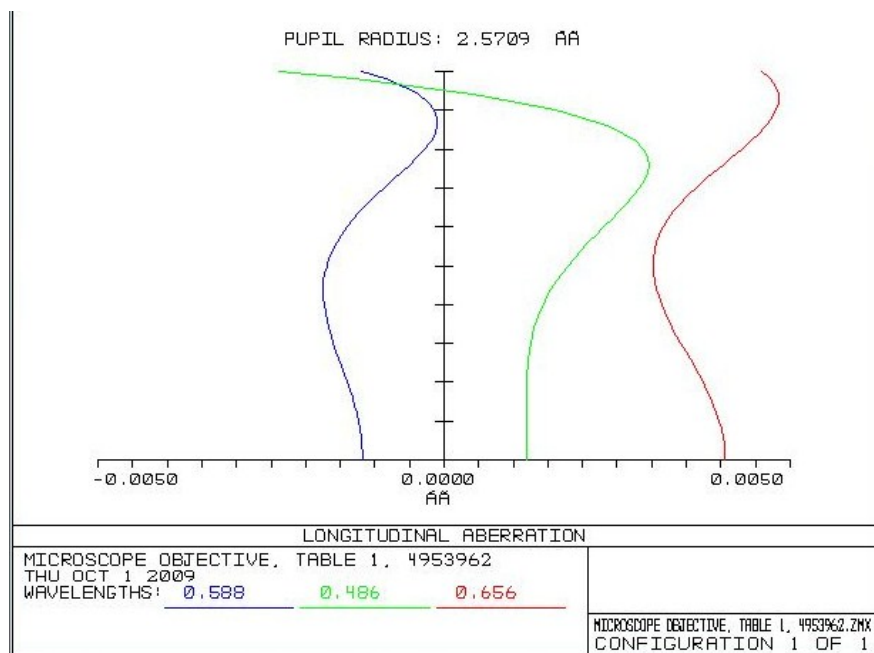


图 1.15 某投影物镜的轴向球差曲线

图 1.15 中球差曲线纵轴表示归一化孔径。横轴表示轴向球差值，球差与光束孔径之间的数值关系，有 Longitudinal Aberration 曲线视窗中“TEXT”给出详细数据。由球差曲线，可以看出单色球差值，高级球差数值，0.707 孔径轴向色差和色球差数值。Primary 波长球差曲线在 0 孔径时的球差值，表示镜头系统的像面与高斯像面有无离焦量。

球差一般用于评价轴上物点的成像质量，如果镜头系统具有大相对孔径，那么球差是影响成像质量的主要像差，且球差与光束孔径高之间的关系已不仅仅是二次函数关系(即初级球差)，还存在高次方关系（高级球差）。

◆ Lateral Color

Lateral Color 是垂轴色差，又称倍率色差，是主光线的像差。物方的一根复色主光线，因折射系统存在色散，在像方出射时将变成多根光线，把 F 光和 C 光在像面上的交点位置之差，称为垂轴色差。图 1.16 表示了 1.3 节例工作波长选成 F, D, C 光时的垂轴色差曲线，纵轴是归一化视场，横轴为垂轴色差数值，单位为： μm ，垂轴色差是一种只跟视场有关的像差，如果视场不大则呈现与视场的线性关系，如视场较大，但还会出现与视场的三次方关系。也可以对每一种波长绘制出它与 Primary 主波长交点之间差值的垂轴色差曲线。

以上四种是 ZEMAX 提供的主要几何像差，ZEMAX 没有提供跟慧差有关的像差曲线。如果要看慧差，可用 ZEMAX Program Language 编写程序，计算出慧差与视场、光束孔径之间的数值关系。

在 Miscellaneous 中，还给出其他功能，如 Footprint Diagram 可以显示每一个光学面上的通光情况，用于查看渐晕或检查表面通光面积：Y-Y bar Diagram 是国外教材和专著讨论较多的

作图法光学设计方法。 Y 指轴上物点光线在每一个光学面上的高度， $\bar{Y}$ 指全视场主光线在每一个光学面上的高度，从理论上只要知道每一个光学面上的 Y 、 $\bar{Y}$ 和焦氏不变量，就能求出每一个光学面的曲率 C_j ，焦距及光学面之间的间隔，且为唯一解。

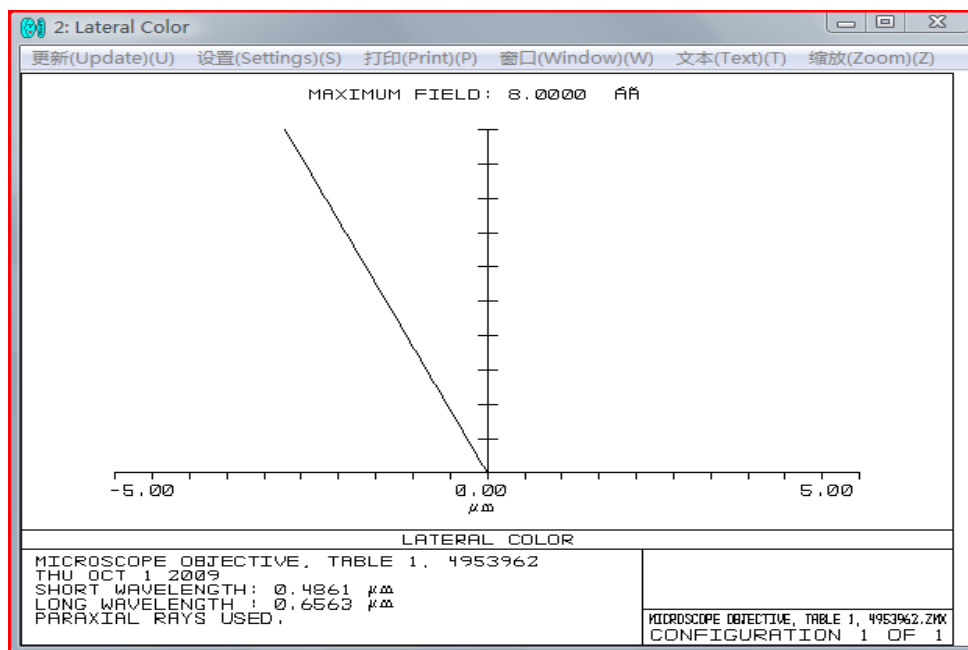


图 1.16 1.3 节例中的垂轴色差曲线

第二章 ZEMAX 优化与操作符

前一章讨论了 ZEMAX 光学设计软件中的用户界面功能与像质评价指标的物理意义。在此基础上可以进行光学设计中初始结构的建立与像质评价。如果像质不能满足使用要求，需要对初始结构尝试优化设计。优化设计是光学设计中的重要阶段，由像质评价技术课程，优化设计涉及评价函数、权因子、阻尼因子等重要概念。在常用的阻尼最小二乘法优化设计的基础上，还有全局优化（Global Search）和海默（Hammer）优化。其中全局优化采用的算法是遗传算法、逃逸函数法、专家系统、传统阻尼最小二乘法的组合算法；海默优化算法，是基于全局优化获得或专家给出的已经很好的初始结构，做再次精炼的最优算法。

本章主要讨论常用的阻尼最小二乘法优化方法，在实施优化设计时所涉及到的概念。

2.1 Merit Function（评价函数）的构成要素

Merit Function 评价函数，是光学系统如何与指定的设计目标相符的数字代表。评价函数值为 0，表示当前光学系统完全满足设计目标要求。评价函数值愈小，表示愈接近。由 Editors→Merit Function 可打开评价函数编辑器。

一般地，评价函数可定义为设计目标像差值与当前系统像差值之差的平方和，结合权因子构成。定义式可写成：

$$MF^2 = \frac{\sum W_i (V_i - T_i)^2 + \sum (V_j - T_j)^2}{\sum W_i} \quad (2.1)$$

其中 V_i 是第 i 种操作符的实际值， T_i 为第 i 种操作符的目标值， W_i 为第 i 种操作符的权因子。这里的操作符是 ZEMAX 使用的可以代表“广义像差”的符号。有关概念将在本章第 2 节开始介绍。式中除以 $\sum W_i$ 表示评价函数中权因子被自动归一化。 $W_i > 0$ ，该操作符被当作像差，ZEMAX 设计让 $W_i (V_i - T_i)^2$ 达到局部最小； $W_i = 0$ ，该操作符无作用； $W_i < 0$ ，则 ZEMAX 自动设置 $W_i = 1$ ；此时， $W_i (V_i - T_i)^2$ 自动用 $(V_j - T_j)^2$ 代替，称之为 Lagrangian Multipliers(拉格朗日乘子)，一般 $(V_j - T_j)^2$ 对应透镜的边界条件。

因此，评价函数由操作符以及相应的目标值、权因子构成。

2.2 评价函数的“默认”（缺省）构成方法

评价函数的建立及构成元素的确定，是光学设计人员参与的重要内容之一，需要使用者确定由哪些像差构成评价函数中的元素，这里的像差，可以指独立几何像差、弥散图（点列图）、波像差、传递函数等，以及光学系统高斯数据如焦距、放大倍率、总长等等。因此评价函数的

建立是光学设计初学者的难点之一，主要涉及（1）选择哪些像差元素构成评价函数；（2）每一个像差的元素权因子选择为多少？

ZEMAX 提供了便捷的评价函数建立方法，也提供了柔性的由设计者自由发挥的建立方法，前者称之为“傻瓜”建立方法。

通过“Editors → Merit Functions → Tools → Default Merit Functions”可以打开“傻瓜”评价函数建立对话框，如图 2.1 所示。



图 2.1 “傻瓜”评价函数建立的对话框

由图 2.1 所示，建立“傻瓜”评价函数时，一般选择反映像质的“总体”指标，如弥散圆或波像差等，并且要做如下考虑：

- （1）选择像质评价指标的 RMS 值还是 Peak to Valley (PTV) ？
- （2）使用波像差（Wavefront），还是点列图（弥散圆）（即 Spot Radius， Spot X， Spot Y， Spot X+Y）？
- （3）像质指标的零点在哪里？
- （4）选择哪种光瞳细分方式（Pupil Integration Method）？

图 2.1 中内容有四块，第一为“Optimization Function Reference”，具有“RMS/PTV、Wavefront/Spot、Centroid/Chief Ray/Mean”等选项；第二为“Pupil Integration Method”，选择入瞳面细分方法；第三块为“Thickness Boundary Values”，定义边界条件；第四块为评价函数有关的其他辅助选项。

◆ RMS 或 PTV

RMS 是 Root-Mean-Square 的缩写，表示求出均方根偏差；

PTV 是 Peak-to-Valley，俗称峰谷值。

◆ RMS 或 PTV

Wavefront 是波像差，单位为：波长单位；

Spot X 指像面上 X 方向的最大垂轴几何像差值，Spot Y 类推；

Spot X+Y 指像面上 X, Y 方向的最大弥散，考虑像差的符号。

◆ Centroid / Chief Ray/Mean

Centroid—质心，一般指某一视场的质心（即每一个俗称具有一个质心），尤其适用于波像差构成的评价函数，此时可扣除波差数据中的常数项（Piston），X-Tilt 与 Y-Tilt。Chief Ray 是使用主波长时的主光线时的主光线作为计算基准，这是过去常被使用的计算基准。Mean 值平均，仅适用于选取 Wavefront 来构造评价函数的场合，其与 Centroid 的差别，是仅从波差数据中扣除常数项（相当于 Mean Wavefront），但不扣除 X-Tilt 和 Y-Tilt。

◆ Pupil Integration Method

Pupil Integration Method 为光瞳积分方法，需要对光瞳（一般指入瞳）进行细分，与某一视场一起，产生充满光学系统入瞳的入射光线。光瞳细分方法具有 Gaussian Quadrature 方法与 Rectangular Array 方法。

Gaussian Quadrature 为高斯二次积分，简称 GQ，用 Rings×Arms 来定义光线数目，高斯积分方法是诸多方法中需要计算光线数目少，但精度高的一种方法，所以是 ZEMAX 中的首选方法。Rectangular Array 为矩形网格（RA），用 Grid（4×4，6×6，8×8，……）形式确定光线数，计算速度慢且精度低。

◆ Thickness Boundary Values

用于定义光学系统中玻璃或空气的最小与最大中心厚度，以及最小边缘厚度，其中玻璃最小与最大中心厚度要根据光学系统中元件的口径按经验或参考文献[2](李林等，《光学设计手册》，北京理工大学出版社，1996.8，第二版)中关于透镜边缘及中心厚度给定。

完成定义后，要注意查看评价函数编辑器中当前光学系统参数的边界条件有无越界，尤其是空气间隙中像距跟普通透镜间隔边界要求不同，要注意区分。

◆ 其余辅助选项

“Assume Axial Symmetry”复选框，如果当前光学系统为旋转对称系统，则选之，此时仅追迹一半光瞳的光线。

“Ignore Lateral Color”复选框，缺省条件下，不予选中，表示 ZEMAX 计算所有的 RMS 或 PTV 时，相同视场不同波长的光线选用同一计算标准，即主波长光线或质心（Centroid）；如果选中，每一波长具有自己独立的计算基准，适用于设计分色棱镜或分光光谱光学系统。

“Start At”指评价函数编辑器中的操作符起始行序号，定义该序号的目的主要是防止覆盖原先定义好的操作符。

“Relative X Weight”定义相对权重，仅当选用 Spot X+Y 时才起作用，定义点列图中 X 分

量和 Y 分量之间的相对权重。如 >1 ，则 X 分量重要； <1 ，Y 分量重要； $=1$ ，同等重要。

完成以上选项，点中“OK”，则在“Merit Function Editor”中会出现多行的控制内容。下面再设置好光学系统的变量后，就可以进行优化设计了。

“傻瓜”评价函数建立方法的特点是较为便捷，无须搞清楚具体操作符的含义，以及权因子究竟选多少合适。因主要采用 Wavefront 和 Spot Radius 作为评价指标，所以该评价函数建立方法适用于像面面型固定的设计场合，如照相机镜头、平行光管物镜、波面变换物镜等。

2.3 修改成自定义评价函数法

由“Editors → Merit Function”可以打开评价函数编辑器，用“Insert”或“Delete”键可增删，编辑评价函数，评价的编辑器是一种电子表格形式，每一行都是对一个操作符的描述，该电子表格的表头如图 2.2 所示。

Oper#	Type	Int 1	Int 2	Hx	Hy	Px	Py	Target	Weight	Value	%Contrib

图 2.2 Merit Function 编辑器电子表格表头样式

Oper#——操作符所处的位置序号；Type——操作符名称，一般由四个大写英文字母组成，如后面介绍的“EFFL”，就是控制系统有效焦距的操作符；Int1 和 Int2——正整数，用来定义操作符所需的参数；Hx 和 Hy——归一化视场；Px 和 Py——归一化光瞳直径；Target——操作符目标值；Weight——操作符的权因子；Value——ZEMAX 自动计算出的该操作符的实际值；%Contrib——ZEMAX 自动据操作符的目标值与实际值偏差及权因子计算在整个评价函数中的贡献量，贡献量最大值为 100，最小值为 0，贡献量大小决定该操作符控制的“像素”被优化设计满足的程度。

图 2.2 中表头，对不同的操作符出现的形式不一样，有时会全部出现，如反映百分畸变的 DISG，有的只出现部分，如控制有效焦距的 EFFL。ZEMAX 提供 285 种操作符，作为评价函数构建所用的“砖头”，如果能弄清楚这些操作符的物理含义，使用起来就会得心应手，进行自定义评价函数。操作符种类的分布情况，如表 2.1 所示。

下面来介绍内建操作符中部分常用的符号和所代表的意义。

◆ 高斯光学参数（外形尺寸数据）

First Optical Properties 代表高斯光学参数，属于基本光学特性。包括：

EFFL: Effective focal length 的缩写，指定波长号的有效焦距；

EFLX: 主波长情况下，指定面范围内 X 面里的有效焦距；

EFLY: 主波长情况下，指定面范围内 Y 面里的有效焦距；

✓ 对于旋转对称系统而言，EFLX 和 EFLY 可以控制中间系统的焦距；

PIMH: 指定波长的近轴像平面上的近轴像高；

POWR: 标准类型面 (Standard Surface) 中指定面指定波长的光焦度 $\varphi = \frac{n'-n}{r}$;

PMAG: 指定波长近轴垂轴放大率 $\beta = \frac{y'}{y}$, y' 表示主光线在近轴象平面上的高度, y 表示物高。仅用于有焦系统, 如果存在畸变, β 与应用光学中的 β 有差别。

AMAG: 角放大率。近轴像空间与物空间的指定波长主光线焦距之比;

ENPP: 以第一面为零点的入瞳位置 (近轴) —— 无参量指定;

EXPP: 以像面为零点的出瞳位置 —— 无参量指定;

EPDI: 无参量指定的入瞳直径;

LINV: 拉氏不变量, 用指定波长近轴子午和主光线数据计算;

WFNO: Working F/#的简写, $W = 1/2n' \sin \theta'$, 其中 θ' 为像空间边缘光学孔径角, n' 为像空间折射率 —— 无参量指定;

ISFN: Image Space F/#的简写, 表示近轴有效焦距/近轴入瞳直径 —— 无参量指定;

SFNO: Sagittal Working F/#的简写, 指定视场与波长的弧矢工作 F/#;

TFNO: Tangential Working F/#的简写, 指定视场和主波长的子午工作 F/#;

OBSN: Object Space Numerical Aperture 的缩写, 针对轴上点的主波长计算物空间的数值孔径。

表 2.1 ZEMAX 优化设计所用的内建操作符分布

种 类	数 量
高斯光学参数	16
像差传递控制操作符	37
光学传递函数	9
圆内能量	2
透镜边界条件	50
光学面 8 个参数控制	24=3×8
Extra Data	3
光学材料控制	10
光线数据 (近轴、实际光线)	44
光学件全局坐标控制	6
数学运算操作符	20
多重结构	5
其他 (包括高斯光束、渐变折射率、用户自定义操作符、无序控制等)	59
总计	285

◆ 像差控制操作符

SPHA: 由指定面贡献的球差值, 单位: 波长。指定 Surf 与 Wave; 如果 Surf=0, 则指整个系统的球差总和。因没有指定 Px, Py, 故只为初级球差。

COMA: 指定面贡献的慧差, 单位: 波长。指定 Surf 与 Wave; 如果 Surf=0, 则指整个系统的慧差总和。没有指定孔径 (Px, Py) 与视场 (Hx, Hy), 因此仍为三级慧差 (属赛德像差)。

ASTI: 三级像散, 指定面贡献的像差, 单位: 波长。

FCGS: 指定视场和波长的归一化弧矢场曲;

FCGT: 指定视场和波长的归一化子午场曲;

FCUR: 指定光学面贡献的场曲, 单位: 波长; 指定 Surf 与 Wave; 如果 Surf=0, 则指像面上的慧差, 三级慧差, 属赛德像差。

DIST: 指定光学面贡献的畸变, 单位: 波长; 三级畸变, 属赛德像差。

DIMX: 指定视场和波长的最大畸变。如果视场号为 0, 则指最大视场对非旋转对称系统无效 (即 x, y 视场要一样)。

DISC: 标准畸变, 用于设计 $f\theta$ 透镜, 最大波长。

DISG: 控制归一化百分畸变。指定任何视场点作为参考, (Ref Fld) 指定波长和视场, 指定孔径 (光瞳)。

AXCL: 控制近轴轴向色差, 单位: 长度单位, 无参数指定;

LACL: 控制垂轴色差。无指定参数, 指初级像差 $\delta y'_{FC} = C_2 y'$;

✓ 以主光线为参照的垂轴几何像差:

TRAR: 径向尺寸, 指定波长孔径 (Px, Py) 视场 (Hx, Hy);

TRAD: TRAR 的 x 分量, 指定同上;

TRAE: TRAR 的 y 分量, 指定同上;

TRAI: 垂轴几何像差半径, 指定面号、波长、孔径和视场;

TRAX: X 面 (弧矢面) 内的垂轴几何像差; 指定面号、波长、(Px, Py) 和 (Hx, Hy);

TRAY: Y 面 (子午面) 内的垂轴几何像差; 指定面号、波长、(Px, Py) 和 (Hx, Hy);

✓ 以质心为参照的垂轴几何像差:

TRCX: 垂轴几何像差的 X 分量, 指定面号、波长、(Px, Py) 和 (Hx, Hy);

TRCY: 垂轴几何像差的 Y 分量, 指定面号、波长、(Px, Py) 和 (Hx, Hy);

TRAC: 像面上的弥散圆半径; 建议用户在 Merit Function 的 “Default Merit Function” 中使用, 不要单独使用;

✓ 波像差控制操作符:

OPDC: 以主光线为参照的波像差, 单位: 波长; 指定波长、孔径和视场;

OPDM: 以 Mean 为参照的光程差, 指定同上;

OPDX: 光程差, 以质心为参照系;

其余项不太常用, 在此不做介绍。

◆ 光学传递函数操作符

✓ 衍射传递函数:

MTFA: 指定采样密度、波长、视场和空间频率的平均衍射调制传递函数(子午和弧矢的平均);

MTFT: 子午调制传递函数(衍射);

MTFS: 弧矢调制传递函数;

MTFA、MTFT、MTFS 操作符需指定的指定参数:

采样密度: 1— 32×32 , 2— 64×64 , ……

波长: 0—多色, 1—波长 1, ……

视场: 有效视场编号;

空间频率: 单位: 1/mm;

✓ 几何传递函数:

GMTA: 平均几何调制传递函数;

GMTS: 弧矢几何调制传递函数;

GMTT: 子午几何调制传递函数;

✓ 方波调制传递函数:

MSWA: 平均方波调制传递函数;

MSWT: 子午方波调制传递函数;

MSWS: 弧矢方波调制传递函数;

✓ 注意:

(1) 传函优化速度慢, 一开始先应用 RMS Wavefront or Spot 评价函数优化, 使像质较好, 如需提高传函, 则再用传函优化;

(2) Wavefront 很大如大于 2λ 以上时, 衍射传函计算出错, 此时可用几何传函查看传递函数情况; 如像质很好, 可计算或优化衍射传函;

(3) 几何传函计算时间长于衍射传函。

◆ 透镜边界条件

✓ 控制玻璃厚度与空气间隔以及边缘厚度:

在下列符号中, 第三个字母为“E”的控制符只适用于旋转对称系统, 其余均可用于旋转与非对称系统, 需要指定光学面范围。

MNCG: 最小玻璃中心厚度;

MNEG: 最小玻璃边缘厚度;

MXCG: 最大玻璃中心厚度;	MXEG: 最大玻璃边缘厚度;
MNCA: 最小空气中心厚度;	MNEA: 最小空气边缘厚度;
MXCA: 最大空气中心厚度;	MXEA: 最大空气边缘厚度;

以下控制符既适合于控制玻璃, 也适合于控制空气间隔;

MXET: 最大边缘厚度;	MNET: 最小边缘厚度;
MNCT: 最小中心厚度;	MXCT: 最大中心厚度;

下列符号适用于非旋转对称系统。通过检查周长上许多点, 看边缘厚度是否超标, 需要指定光学面范围。

XNEG: 最小玻璃边缘厚度;	XXEG: 最大玻璃边缘厚度;
XNEA: 最小空气边缘厚度;	XXEA: 最大空气边缘厚度;
XNET: 最小边缘厚度;	XXET: 最大边缘厚度;

✓ 单个光学面的控制符:

CTLT: 中心厚度小于;	ETGT: 边缘厚度大于;
CTGT: 中心厚度大于;	ETLT: 边缘厚度小于;
CTVA: 中心厚度值;	ETVA: 边缘厚度值;

使用上述控制符, 需要指定面号。

✓ 控制透镜形状, 使用控制符时; 需要指定某一光学面号:

CVVA: 曲率值;	COGT: Conic 大于;
CVGT: 曲率值大于;	COLT: Conic 小于;
CVLT: 曲率值小于;	COVA: Conic 值;
SVGZ: XZ 平面内矢高;	SAGY: YZ 平面内矢高;

✓ 控制透镜口径以及口径与厚度比:

DMVA: 口径值;	MNSD: 最小半口径;
DMGT: 口径大于;	MXSD: 最大半口径;
DMLT: 口径小于;	

使用上述控制符时, 需要指定某一光学面。

MNDT: 最小直径/中心厚度之比;	MXDT: 最大直径/中心厚度之比;
<i>MNDT 和 MXDT 需要指定 First Surf, Last Surf, 只有对玻璃或介质有效, 对空气介质无效。</i>	
TTLT: 总厚度小于;	TTGT: 总厚度大于;
TTVA: 总厚度值;	

使用上述控制符时, 需要指定 Surf 号与 Code。其中 code 为 0 代表 +y 轴, 为 1 代表 +x 轴, 为 2 代表 -y 轴, 为 3 代表 -x 轴, 图 2.2 表示了透镜总厚度的含义。

TTHI: 指定起始面 (First Surf) 到最后一个面 (Last Surf) 之间的光轴厚度总和; 该控制符适用于控制光学系统的实际长度;

TOTR: 从第一面到像面，称为系统总长或光学筒长，无指定参数；

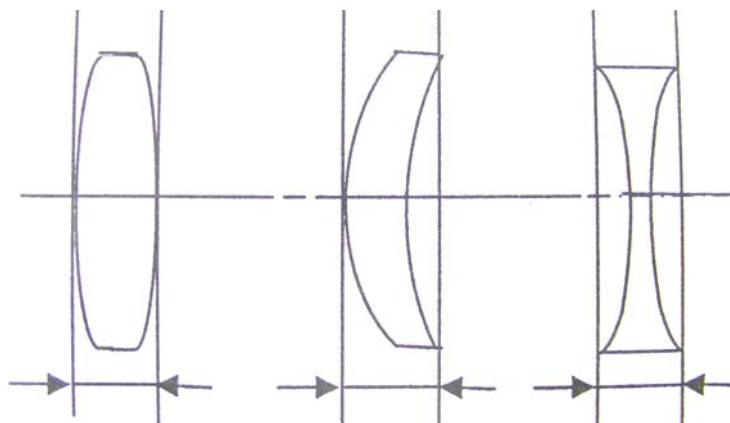


图 2.2 透镜总厚度的示意图

◆ 光学材料控制操作符

MNIN: 最小 d 光折射率；

MXIN: 最大 d 光折射率；

MNAB: 最小阿贝色散系数 (V_d)；

MXAB: 最大阿贝色散系数 (V_d)；

MNPD: 最小部分色散 (ΔP_{gF})；

MXPD: 最大部分色散 (ΔP_{gF})；

这里的 6 个操作符可用于需要将玻璃材料作为变量优化的场合，控制玻璃的折射率、色散系数符合常见玻璃的变化范围；其中阿贝色散系数与部分色散系数的定义分别为，

$$V_d = \frac{n_d - 1}{n_F - n_C} \quad \Delta P_{gF} = \frac{n_g - n_F}{n_F - n_C}$$

◆ 数学运算操作符

ABSO: 某一操作符结果的绝对值；

MINN: 最小值操作符；

SUMN: 两个操作符结果的和；

MAXX: 最大值操作符；

OSUM: 指定面操作符之间所有操作符之和；

ACOS: 结果的反余弦操作符

DIFF: 两个操作符结果的差；

ASIN: 结果的反正弦操作符；

PROD: 两个操作符结果的积；

ATAN: 结果的反正切操作符；

DIVI: 两个操作符结果的商；

COST: 求结果的余弦操作符；

SQRT: 操作符结果的平方根；

SINE: 求结果的正弦操作符；

OPGT: 操作符结果大于；

TANG: 求结果的正切操作符。

OPLT: 操作符结果小于；

CONS: 定义一个常数；

QSUM: Quadratic Sum 平方和再开方；

EQUA: 几个操作符跟目标值产生相同的差值；

第三章 像差设计在 ZEMAX 中的实现

光学系统的优化设计，最早用于评价像质的指标是几何像差。如果光学系统成像符合理想成像，即由同一物点发出的所有光线通过系统后，应该聚焦于理想像面上的同一像点，满足应用光学中的高斯成像公式，而且高度和理想像高一致。实际上光学系统成像不可能完全符合理想情况，即同一物点发出的光线，经系统后在像空间的出射光线，不再是聚焦于理想像的同心光束，而是具有较为复杂的几何结构的像散光束。用来描述像散光的函数是位置和结构的函数，称为几何像差。

据像质评价课程，我们已经具有光学系统的像差概念。如果在可见波段和旋转对称系统，轴上物点，主要存在：球差 ($\delta L'$)、轴轴向色差 ($\Delta L_{FC}'$)，这两种像差仅是光束孔径 h 的函数，对于大相对孔径光学系统，还需要考虑球差和轴向色差的高级情况，即高级球差 $\delta L_{sn}' = \delta L'_{0.707h} - 0.5\delta L_m'$ 和色球差 $\delta L_{FC}' = \Delta L_{FCm}' - \Delta l_{FC}'$ 。对于轴外物点，因光束结构复杂，像差描述分子午、弧矢和主光线像差，有反映子午和弧矢光束像面相对于像平面的弯曲即子午场曲 X_T' 和弧矢场曲 X_S' ；有反映子午、弧矢光束线对偏离主光线的不对称像差，即子午慧差 K_T' 和弧矢慧差 K_S' ；有反映子午面和弧矢面成像光束的不对称像差，即像散 $X'_{TS} = X_T' - X_S'$ ；当光学系统相对孔径较小时，子午和弧矢场曲可以用细光束场曲 x_t' 和 x_s' 代表，像散变成 $x'_{ts} = x_t' - x_s'$ ；主光线像差有畸变和垂轴色差。

以上这些像差，我们需要熟悉概念以及它们与孔径、视场的函数关系，分别弄清楚小视场小相对孔径、小视场大相对孔径、大视场小相对孔径、大视场大相对孔径光学系统的像差特征。

当光学系统的像质没有达到要求时，我们需要建立评价函数和确定变量、边界条件，对现有的初始结构进行优化设计；由前面的内容知道，建立评价函数的方法有多种，评价函数反映了设计者的设计思想。当用 **Default Merit Function** 建立评价函数，经过优化后，如像质还不尽人意，此时应该如何修改评价函数，往往还需归结到几何像差的分析和校正上来；同时，由过去的理论学习，像差理论是多年的光学设计实践和理论研究的结晶，使用像差（指独立几何像差）设计方法，能够快捷地获得设计结果或中间结果，为后续采用 **MTF** 优化提供基础；另外，有些设计场合，为简化结构，需要采用分阶段设计和像差补偿的设计方案，即让其中不同部分的光学系统留有残余像差，但符号相反，光学组合后，残余像差自动抵消，为了设计时能恰当地控制残余像差量，要采用像差设计方法；还有，有些设计情况下，像面不一定要为平面，也无法知道像面的面型具体方程，这时的设计也宜采用像差设计方法，配合像差容限考虑来完成。

因此有必要讨论像差设计的概念和方法，像差设计是在熟悉当前光学系统的特性的基础上，根据像差校正方案，确定轴上与轴外分别需要校正哪些像差，在评价函数编辑器中建立这些像差控制操作符，然后再进行优化设计。

3.1 Default Merit Function 和现有像差控制符的局限性

如 2.2 节所述, Default Merit Function 定义的评价函数由点列图或波像差构成, 用于优化象平面或具有固定面型的像面上的成像质量, 不能完成任意独立几何像差的控制。

ZEMAX 也提供了内建的像差控制操作符, 下面就对这些操作符做比较分析, 阐述现有像差控制操作符的局限性

3.1.1 轴上点的像差操作符的局限性

ZEMAX 为轴上点提供了两个像差操作符, 即 SPHA, AXCL, 其中 SPHA 是指定光学面的球差贡献量, 单位: 波长。无需指定孔径, 因此, 不能控制某一特征孔径的球差; AXCL 是控制近轴位置色差 $\Delta l'_{FC}$ 。

以上两个像差操作符, 仅适用于小视场小相对孔径的设计场合。根据轴上点像差概念的学习, 我们知道, 对于大相对孔径的光学系统, 要控制其轴上物点的成像质量, 至少要控制 $\delta L'_m$ 、 $\Delta L'_{FC0.707}$ 、 $\delta L'_{sn}$ 和 $\delta L'_{FC}$ 到预定的目标值, 但是利用 ZEMAX 内建控制操作符不能实现这种控制。

3.1.2 轴外物点的像差操作符的局限性

轴外物点的像差设计更为复杂, 对于不同光学特性的系统, 像差设计要求不一样。对小相对孔径小视场光学系统, 像差设计最简单, 最多要求校正孔径与视场的初级像差; 对大相对孔径小视场光学系统, 则将像差控制集中到跟孔径有关的高级像差上面来, 至于视场像差, 仍只控制视场初级像差; 对小相对孔径大视场光学系统, 则要将像差控制集中到跟视场有关的像差上面来, 根据视场达到的程度, 如中等视场, 广角, 超广角, 决定是否校正跟视场有关的高级像差。

ZEMAX 的内建像差控制操作符中, 轴外像差操作符含义如表 3.1。

种类	名称	含 义	局限性
慧差	COMA	某一面慧差贡献量, 单位: 波长	无法控制跟视场、孔径有关的子午、弧矢慧差
场曲	FCUR	某一面场曲贡献量, 单位: 波长	无法控制宽光束场曲 (应用与大相对孔径大视场情形)
	FCGS	某一视场细光束弧矢场曲	
	FCGT	某一视场细光束子午场曲	
像散	ASTI	某一面像散贡献量, 单位: 波长	无法控制宽光束像散
畸变	DIST	某一面畸变贡献量, 单位: 波长	
	DIMX	视场最大畸变允许量	
	DISG	控制跟视场有关的归一化百分畸变	
	DISC	控制校准畸变	
垂轴色差	LACL	两边缘波长主光线与像面交点之间的 y 轴向间隔距离	无法控制色擦高级色差

综上所述，现有 ZEMAX 的内建的像差控制操作符无法控制指定孔径的球差、轴向色差、高级球差和色球差，也无法控制跟孔径和视场有关的慧差、高级慧差，跟孔径有关宽光束场曲、像散，无法控制需要的垂轴色差曲线，高级垂轴色差。对这些问题，是一个好的光学设计工作者必须要解决的。下面我们就具体的例子说明常见像差在评价函数中控制的实现方法，这些方法可为大家今后建立其他像差控制操作提供参考。

3.2 常见像差控制在评价函数中的实现

在评价函数中建立像差控制操作符，仍然要从像差的基本概念入手，所以一定要不断地回忆和复习过去学到的像差概念。

3.2.1 轴上球差、色差的控制操作符

轴上物点球差、色差、高级球差、色球差都是跟孔径有关的像差，控制操作符的建立都可源于球差概念。首先我们复习球差，如图 3.1 所示：

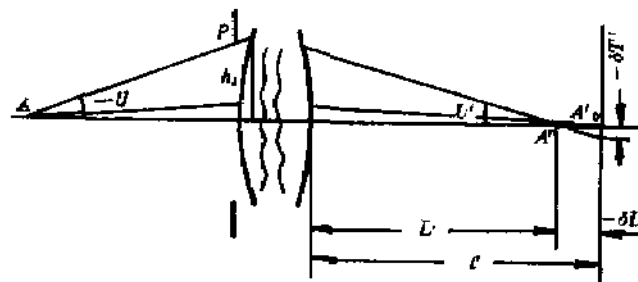


图 3.1 跟孔径有关的球差示意图

轴向球差 $\delta L'$ 跟垂轴球差 ΔT 的关系是 $\delta L' = \frac{\Delta T}{\tan U'}$ ，如果知道某孔径光线在像面上的交点高度 ΔT ，该孔径光线在像方的孔径角 U' ，就能得到任意孔径的轴向球差 $\delta L'$ 。因此需要 ZEMAX 进行光线追迹，查看 ZEMAX 对实际光线的追迹的控制操作符，我们选用 TRAY 得到 ΔT ，RAGC 得到该孔径光线的方向余弦，在经 ACOS，TANG 得到 $\tan U'$ 。

表 3.2 给出了控制球差的实例，用于控制某一物镜（如图 3.2）的单色球差方法，该表还给出了控制 0.707h 轴向色差的实例。

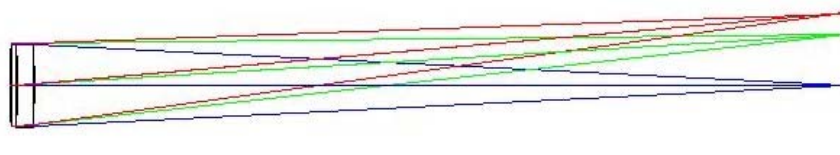


图 3.2 控制球差应用的光学系统实例的示意图

表 3.2 控制图 3.2 所示光学系统的球差 MTF 函数实例

评价函数编辑: 1.017945E-002

Oper #	Type	Op#1	Op#2					Target	Weight
1 BLNK	BLNK	control spherical aberration for whole aperture							
2 BLNK	BLNK								
3 TRAY	TRAY		2	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000	0.000000	0.000000
4 RAGC	RAGC	4	2	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000	0.000000	0.000000
5 ACOS	ACOS	4	1					0.000000	0.000000
6 TANG	TANG	5	1					0.000000	0.000000
7 DIVI	DIVI	3	6					0.000000	5.000000
8 BLNK	BLNK	control longitudinal chromatic aberration at 0.707 aperture							
9 TRAY	TRAY		1	0.000000	0.000000	0.000000	0.707100	0.000000	0.000000
10 TRAY	TRAY		3	0.000000	0.000000	0.000000	0.707100	0.000000	0.000000
11 CONS	CONS							0.707000	0.000000
12 PROD	PROD	11	6					0.000000	0.000000
13 DIVI	DIVI	9	12					0.000000	0.000000
14 DIVI	DIVI	10	12					0.000000	0.000000
15 DIFF	DIFF	13	14					0.000000	5.000000
16 RAGC	RAGC	4	2	0.000000	0.000000	0.000000	0.707100	0.000000	0.000000
17 ACOS	ACOS	16	1					0.000000	0.000000
18 TANG	TANG	17	1					0.000000	0.000000
19 DIVI	DIVI	9	18					0.000000	0.000000
20 DIVI	DIVI	10	18					0.000000	0.000000
21 DIFF	DIFF	19	20					0.000000	5.000000

由表 3.2 所示，表中控制的球差是全口径的球差，其中 TRAY 定义的光束孔径、波长号应与 RAGC 定义的光束孔径、波长号一致，即对同一条光线进行追迹计算。表中第 7 操作符计算的结果就是轴上点在中间波长和 1.0h 孔径时的球差，第 15 或 21 操作符计算的结果是轴上点带光（0.707h 孔径）时的轴向色差，目的一样，但所取的方法稍有不同。

在任意孔径、任意波长的球差能够控制的基础上，我们可以建立任意孔径的轴向色差计算控制操作符，也可以建立高级球差、色球差的控制操作函数。

表 3.3 展示了图 3.2 结构的高级球差，色球差的控制方法。其中第 1 到第 7 操作符完成孔径球差的计算，其结果可用于高级球差的计算；第 6 个操作符计算出的 1.0h 孔径光线在像方的孔径角，用于计算 1.0h 孔径的**轴向色差**，供计算色球差使用。其中第 16 个操作符的结果是高级球差，第 27 操作符的结果是**色球差**。需要注意：在计算轴向色差和色球差时，都要利用中间波长的像面为计算基准；另外，为了确保无误，应理清这里一系列的控制符中，哪个结果是我们要控制的像差，并注意检查其值与 ZEMAX 中曲线给定的值是否一致。

须注意，ZEMAX 给出的近轴位置色差的控制操作符计算结果，符号反了，为了和实际结果相符，必须乘以-1，这由第 24, 25 操作符完成。

3.2.2 轴外初级像差的控制操作符

由表 3.1 可知，ZEMAX 仅给出了轴外像差中细光束场曲、像散、畸变的控制操作符，由此可以控制跟视场有关的初级与高级像差。至于孔径和视场的初级慧差、宽光束场曲与像散，需要我们能够定义它们的控制操作符。另外，轴外色差，ZEMAX 仅给出 LACL 操作符，但该操

作符不能控制任意视场的色差，也无法控制整条色差曲线走向，因此我们要建立垂轴色差的控制操作符。

表 3.3 高级球差、色球差的控制

评价函数编号: 1.961429E-001

Oper #	Type	Op#1	Op#2					Target	Weight	Value	% Contrib
1	BLNK	control spherical aberration for whole aperture									
2	TRAY		2	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000	0.000000	0.000000	-5.22824E-003	0.000000
3	RAGC		4	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000	0.000000	0.000000	0.998747	0.000000
4	ACOS		3					0.000000	0.000000	2.868336	0.000000
5	TANG		4					0.000000	0.000000	0.050104	0.000000
6	DIVI		2					0.000000	5.000000	-0.104348	0.140111
7	BLNK	high order spherical aberration									
8	TRAY		2	0.000000	0.000000	0.000000	0.707000	0.000000	0.000000	-3.09368E-003	0.000000
9	RAGC		4	0.000000	0.000000	0.000000	0.707000	0.000000	0.000000	0.999374	0.000000
10	ACOS		9					0.000000	0.000000	2.027190	0.000000
11	TANG		10					0.000000	0.000000	0.035396	0.000000
12	DIVI		8					0.000000	0.000000	-0.087402	0.000000
13	CONS							0.500000	0.000000	0.500000	0.000000
14	PROD		6					0.000000	0.000000	-0.052174	0.000000
15	DIFF		12					0.000000	0.000000	-0.035228	0.000000
16	BLNK	high chromatic spherical aberration									
17	TRAY		1	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000	0.000000	0.000000	2.876697E-003	0.000000
18	TRAY		3	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000	0.000000	0.000000	-3.81055E-003	0.000000
19	DIVI		17					0.000000	0.000000	0.057415	0.000000
20	DIVI		18					0.000000	0.000000	-0.076053	0.000000
21	DIFF		19					0.000000	5.000000	0.133468	0.229222
22	BLNK	axcl results error by -1									
23	AXCL		0	0.000000				0.000000	0.000000	0.063289	0.000000
24	CONS							-1.000000	0.000000	-1.000000	0.000000
25	PROD		23					0.000000	0.000000	-0.063289	0.000000
26	BLNK										
27	DIFF		21					0.000000	1000.000000	0.196757	99.630666

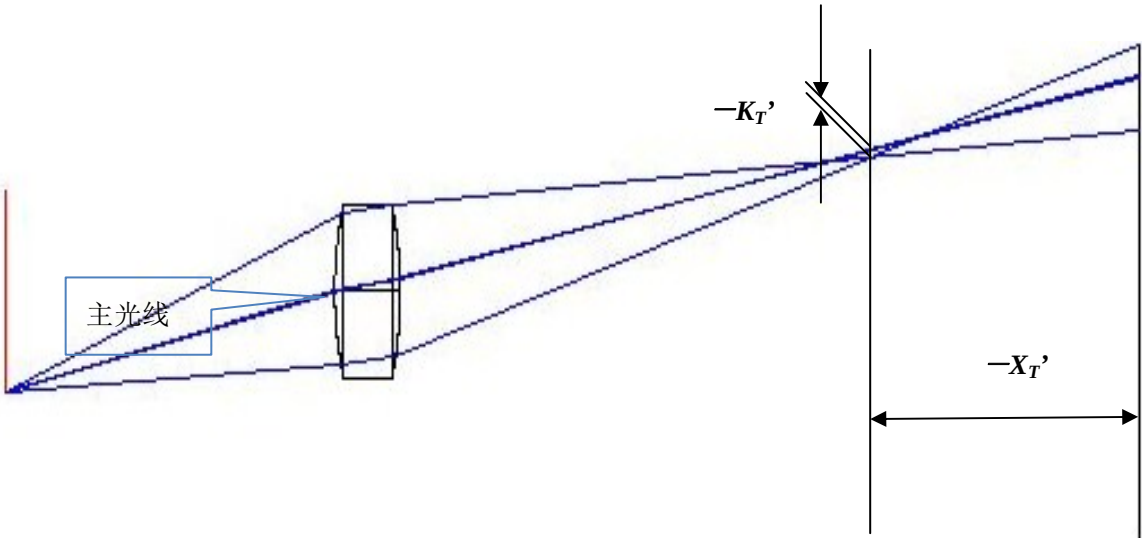


图 3.3 子午慧差和场曲的示意图

A. 轴外宽光束子午像差控制操作符

下面主要解决慧差、场曲的概念，如图 3.3 所示，由定义可以看出，如果上边光与像面交点与主光线高度差为 Δy_+ ，下边光与像面交点与主光线高度差为 Δy_- ，则子午慧差为

$K'_T = (\Delta y_+ + \Delta y_-)/2$ ；如果上边光与光轴的夹角 θ_+ ，下边光与光轴夹角为 θ_- ，则根据几何关系，

子午场曲 $X'_T = (\Delta y_+ - \Delta y_-)/(\tan \theta_- - \tan \theta_+)$ 。由此定义的子午慧差和场曲控制操作符如表 3.4。在表

中，第 6 个操作符的计算结果是慧差，利用了近似计算公式，可以断言，如果第 6 个操作符的结果为 0，则慧差必然等于 0；第 20 个操作符的计算结果是宽公式场曲，为了比较，故意将图 3.2 系统的光束孔径缩小成细光束，这样，第 20 个操作符的结果与 ZEMAX 内建的 FCGT（第 8 个操作符）的结果一致。

表 3.4 宽光束子午慧差与场曲的控制操作符实例

Oper #	Type	Op#1	Op#2					Target	Weight	
1	BLNK	control tangital coma								
2	TRAY		2	0.000000	1.000000	0.000000	1.000000	0.000000	0.000000	-5
3	TRAY		2	0.000000	1.000000	0.000000	-1.000000	0.000000	0.000000	5
4	SUMM	2	3					0.000000	0.000000	1.27
5	CONS							0.500000	0.000000	
6	PROD	4	5					0.000000	0.000000	6.38
7	BLNK	control tangital field curvature								
8	FCGT		2	0.000000	1.000000			0.000000	0.000000	-
9	BLNK	self-defined tangital field curvature								
10	TRAY		2	0.000000	1.000000	0.000000	1.000000	0.000000	0.000000	-5
11	TRAY		2	0.000000	1.000000	0.000000	-1.000000	0.000000	0.000000	5
12	DIFF	10	11					0.707000	0.000000	-10
13	RAGC	3	2	0.000000	1.000000	0.000000	1.000000	0.000000	0.000000	
14	ACOS	13	1					0.000000	0.000000	
15	TANG	14	1					0.000000	0.000000	
16	RAGC	3	2	0.000000	1.000000	0.000000	-1.000000	0.000000	0.000000	
17	ACOS	16	1					0.000000	0.000000	
18	TANG	17	1					0.000000	0.000000	
19	DIFF	18	15					0.000000	0.000000	
20	DIVI	12	19					0.000000	0.000000	25

B. 轴外宽光束弧矢像差控制操作符

类似地，我们可以建立弧矢慧差、场曲的计算控制，弧矢场曲的定义如图 3.4 所示，由于弧矢线对 BD_- 和 BD_+ （假设 $-1.0h$ 和 $+1.0h$ ）以主光线对称，所以，在像方两线对的出射光线在像面上交点偏离主光线的 x 分量大小相等且符号相反，即 $TRAX(-1.0h) = -TRAX(1.0h)$ 。设 $-1.0h$ 孔径的出射光线与 x 轴夹角 θ_{-x} ，与光轴的夹角为 θ_{-z} ，则 $1.0h$ ， $1.0y$ 的弧矢场曲为：

$$X'_S = TRAX_{(1.0y, -1.0h)} \tan \theta_{-x} \cos \theta_{-z} \quad (3.2)$$

由式 3.2 建立的弧矢宽光束场曲控制操作符见表 3.5。该表中第 20 个操作符结果是 $1.0y$ ， $1.0h$ 的弧矢场曲，为了比较，同子午宽光束场曲一样，将光学系统的口径缩小，以便与细光束场曲

做比较，验证操作符计算结果的正确性。在通过模型建立这样的操作符时，由于中间的三角函数和模型中没有考虑到符号规则，要注意结果的符号是否正确，要设法验证。第 4 个操作符的主要结果是 $1.0y$ 、 $-1.0h$ 的光线的出射方向与 x 轴正方向之间的夹角，通过操作符 5, 6 可以得到像方弧矢线对构成的等腰三角形内角 θ_x ，第 8 个操作符为了得到 $\cos\theta_z$ ，第 11 个操作符的结果是为了与第 10 个操作符结果比较。

至于弧矢宽光束慧差的控制操作符，自己可以尝试建立。

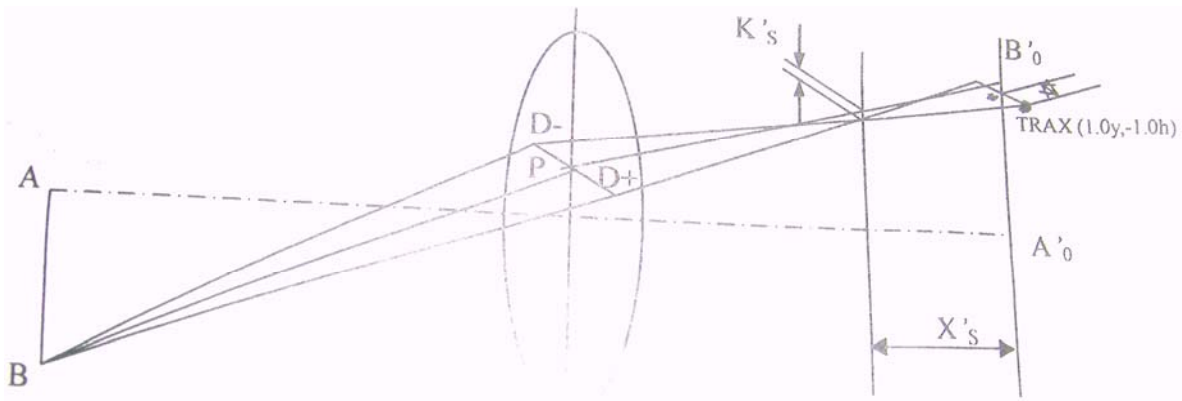


图 3.4 弧矢场曲与慧差的定义

表 3.5 弧矢宽光束场曲控制操作符建立实例

Oper #	Type	Op#1	Op#2					Target	Weight	Value
1	BLNK	control sagittal field at 1.0h, 1.0y								
2	TRAX		2	0.000000	1.000000	-1.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.134323
3	RAGA	6	2	0.000000	1.000000	-1.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.049837
4	ACOS	3	1					0.000000	0.000000	87.143357
5	CONS							180.000000	0.000000	180.000000
6	DIFF	5	4					0.000000	5.000000	92.856643
7	TANG	6	0					0.000000	0.000000	-5.506067
8	RAGC	6	2	0.000000	1.000000	-1.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.995039
9	PROD	2	7					0.000000	0.000000	-0.739590
10	PROD	9	8					0.000000	800.000000	-0.735922
11	FCGS		2	0.000000	1.000000			0.000000	0.000000	-2.310812

C. 轴外垂轴色差的控制操作符

垂轴色差又称倍率色差，是主光线因玻璃色散产生的像差，相对而言，跟视场有关的垂轴色差控制操作符建立要容易得多。

表 3.6 给出了垂轴色差控制操作符的建立方法，该表中第 1、2 个操作符给出了全视场短波长与长波长主光线与像面交点，偏离中间波长主光线的偏差，第 3 个操作符的结果，就是全视场的垂轴色差。

表 3.6 垂轴色差控制操作符的建立

Oper#	Type		Wav	Hx	Hy	Px	Py	Target	Weight
1(TRAY)	TRAY		1	0	1	0	0	0.00	0.00
2(TRAY)	TRAY		3	0	1	0	0	0.00	0.00
3(DIFF)	DIFF	1	2					0.00	0.00

3.2.3 轴外物点视场孔径高级像差的定义及其控制操作符

解决了初级像差的的控制操作符以后，我们就可以根据高级孔径或视场像差的定义，建立高级像差的控制操作符。下面为了比较，先给出轴外的初级像差与孔径 h 、视场 y 的关系，然后给出主要高级像差的定义：

A. 轴外初级像差

$$K'_s = a_2 h^2 y, \quad x'_t = a_3 y^2, \quad x'_s = a_4 y^2$$

$$\delta y'_z = a_5 y^3, \quad \Delta l'_{FC} = C_I, \quad \Delta y'_{FC} = C_2 y$$

B. 轴外高级像差

(1) 子午视场高级球差

$$\delta L'_{Ty} = \delta L'_{T(1h,1y)} - 0.5\delta L'_{(1h,0y)} \quad (3.3)$$

(2) 弧矢视场高级球差

$$\delta L'_{Sy} = \delta L'_{S(1h,1y)} - 0.5\delta L'_{(1h,0y)} \quad (3.4)$$

(3) 孔径高级正弦差

$$SC'_{sn} = SC'_{0.707h} - 0.5SC'_{1h} \quad (3.5)$$

(4) 子午孔径高级慧差

$$K'_{Tsnh} = K'_{T(0.707h,1y)} - K'_{T(1h,1y)} \quad (3.6)$$

(5) 子午视场高级慧差

$$K'_{Tsn y} = K'_{T(1h,0.707y)} - K'_{T(1h,1y)} \quad (3.7)$$

(6) 高级子午场曲

$$x'_{tsn} = x'_{t0.707y} - 0.5x'_{t1y} \quad (3.8)$$

(7) 高级弧矢场曲

$$x'_{ssn} = x'_{s0.707y} - 0.5x'_{s1y} \quad (3.9)$$

(8) 高级畸变

$$\delta y'_{zsn} = \delta y'_{z0.707y} - \delta y'_{1y} \quad (3.10)$$

(9) 色畸变——高级垂轴色差

$$\delta y'_{FCsn} = \delta y'_{FC0.707y} - \delta y'_{FC1y} \quad (3.11)$$

有了以上任意孔径、任意视场初级像差的控制操作符建立方法，由式 (3.3) ~ (3.11) 可以看出，高级像差由不同孔径或视场初级运算而得，所以控制操作符可以通过前面的初级像差操作符组合得到，自己尝试建立。

3.3 像差设计举例

——自由空间光通信中光学天线的设计

自由空间光通信 (Free Space optical Communication, FSO)，又称大气激光通信 (Free Space Laser Commu.) 或无线光通信 (Wireless Optical Commu.)，是近年来出现的通信研究热点。它是以大气为媒介，让载波激光在大气中传输有效信息，达到通信目的。自由空间光通信有无线电通信的便利性，同时也继承了光纤通信的绝大部分优点，尤其是大通信容量的特点，是“无线+带宽”的有效解决方案。

自由空间光通信是一种定向的点对点通信，一个简单的自由空间光通信终端由声像信号编码、激光发射光学天线、激光接收光学天线、声像信号滤波解码等部分组成。其中光学天线相当于一物镜系统，可以采用折射、反射或折反光学系统。用于激光发射和接收的光学天线可以相同，也可以不同，如图 3.5 所示。对于发射用光学天线，应尽量使激光发射光束准直性好，传输距离远；对于接收端光学天线，应尽量多地接收包含目标信号在内的自由空间微弱光辐射，然后将光信号耦合到滤波器的接收端，滤除“噪声”，保留目标信号。

所以对于接收端的光学天线，其光学特性特点：入瞳直径大（便于尽可能多接收来自自由空间的光信号）、具有一定视场（取决于后续耦合滤波的敏感面大小）、相对孔径大、工作波长一般为近红外（与激光器波长有关，常取 1.55 μm，透过率高、大气损耗小、人眼安全），结构尽量简单以增加透过率。

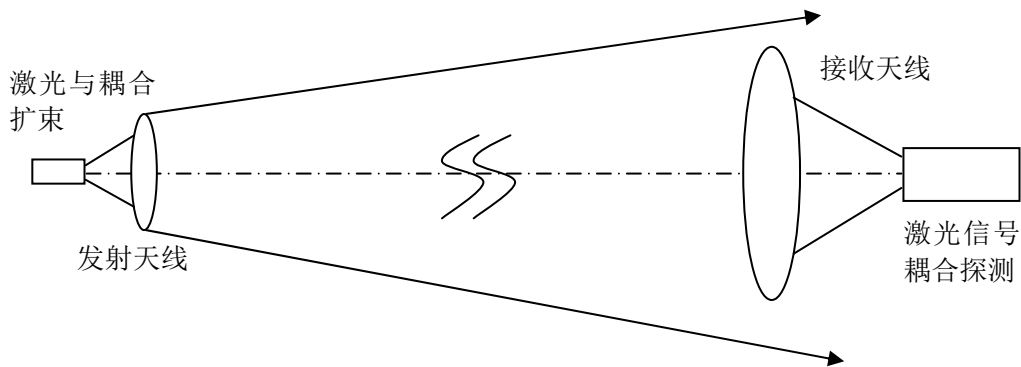


图 3.5 自由空间光通信发射与接收光学天线

像质评价时，应尽量减小弥散圆，光学分辨率与光电探测器分辨率相匹配，像差校正时，要考虑校正球差、慧差、场曲、像散等，还要校正色差等。

1. 设计要求

设计一接收用光学天线，满足以下技术要求：

焦距： $f' = 60 \text{ mm}$ ， $D/f' = 1/1.2$ ，视场角 $2\omega = \pm 0.1^\circ$ ，激光波长： $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ ，激光波长漂移： $1.53 \sim 1.57 \mu\text{m}$ 。

2. 光学特性特点与像差校正要求

根据设计要求，该天线属于一大相对孔径光学系统，色差与后续光纤的纤芯直径相当，因属于定向发射和接收系统，所以视场角不是很大。因此该天线属于大孔径，小视场光学系统，可以采用望远镜物镜或照相物镜形式，工作波长为近红外，波长带宽不算很宽，为获得足够透过率，天线片数要少，可以采用无色光学玻璃材料。

像差校正主要集中在轴上点的单色像差和高级像差，色差估计不大，也加以控制。像质评价可以采用弥散圆和 MTF 指标。

3. 初始结构选择

我们选用参考文献[2]中 pp.288 页的第一个例子，具体结构参数如下：

r	d	玻璃牌号	有效通光孔径
41.69	7.8	ZK10	34
274.312	0.4		
24.32	7.4	ZK10	30.2
62.713	7.0	QK1	29
-155.96	6.0	ZF6	28
15.488	9.8		
32.542	5.5	ZF1	22
-157.4			

其中主要光学特性为： $f' = 52.87 \text{ mm}$ ， $D/f' = 1/1.5$ ，视场角 $2\omega = 30^\circ$ ，物无限远，工作波长可见波段。一般无色普通玻璃透过的光谱范围高达 $2 \mu\text{m}$ ，所以这种构型可以选为该光学天线的初始结构。但是，要做如下修改：（1）将工作波段改成中间波长为 $1.55 \mu\text{m}$ ，校正色差的波长为： $1.53 \mu\text{m}$ 和 $1.57 \mu\text{m}$ ；（2）将结构的焦距由 $f' = 52.87 \text{ mm}$ 缩放到 $f' = 60 \text{ mm}$ 。

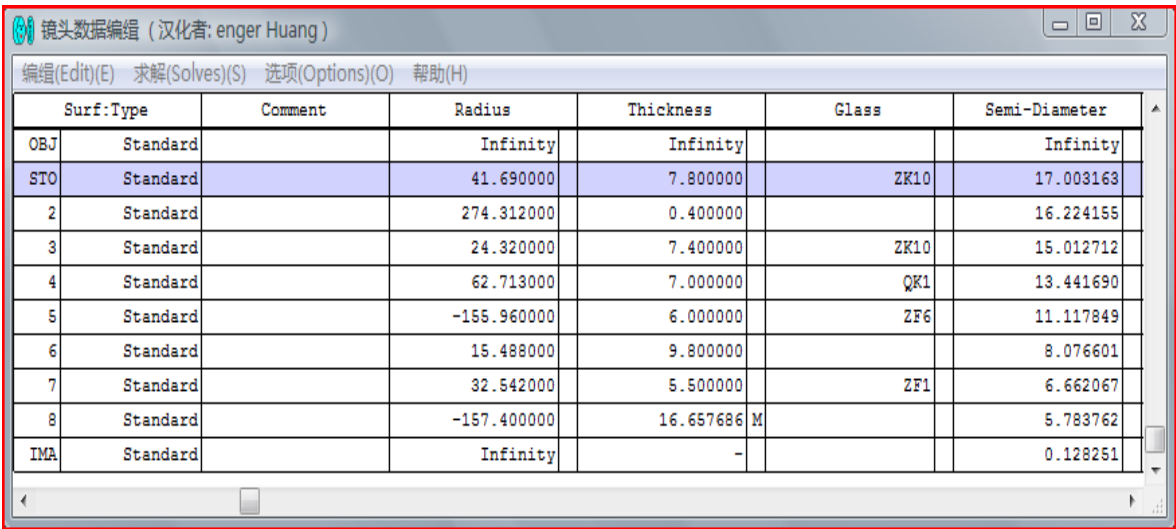
缩放法详细过程：由“Editors → Lens Data Editor → 输入参考文献 2 手册查到的初始结构数据”，如表 3.7 所列，孔径光阑放在第 1 光学面上，第 8 面到 Image 面的距离（像距）可以取为近轴像距，确定方法为：用鼠标单击“Lens Data Editor”中第 8 面的“Thickness 栏”，选择该栏并右击鼠标，从弹出的“下拉选项框”中选取“Marginal Ray Height”，设置 Height 和 Pupil

Zone 均为 0，表示近轴，确定以后，该栏计算得到的数据后会有“M”显示。

选择“System → Wavelength... → 波长输入对话框”，输入波长 1.53, 1.55, 和 1.57，选择主波长（Primary）为 1.55，点击“OK”。选择“System → Field... → 视场输入对话框”，选择 Angle，在 Y-field 框中输入视场 1 为 0，视场 2 为 0.05，表示物点在子午面内，选择 OK。选择“System → General... → Aperture → 孔径输入对话框”，选择 Aperture Type 为 Entrance Pupil Diameter，在 Aperture Value 中输入 34，选择 OK。

这样，主窗口状态栏中可以知道 EFL（系统焦距），WFNO（系统 F 数）、ENPD（入瞳直径）、TOTR（系统从第 1 面到最后一面的长度）。

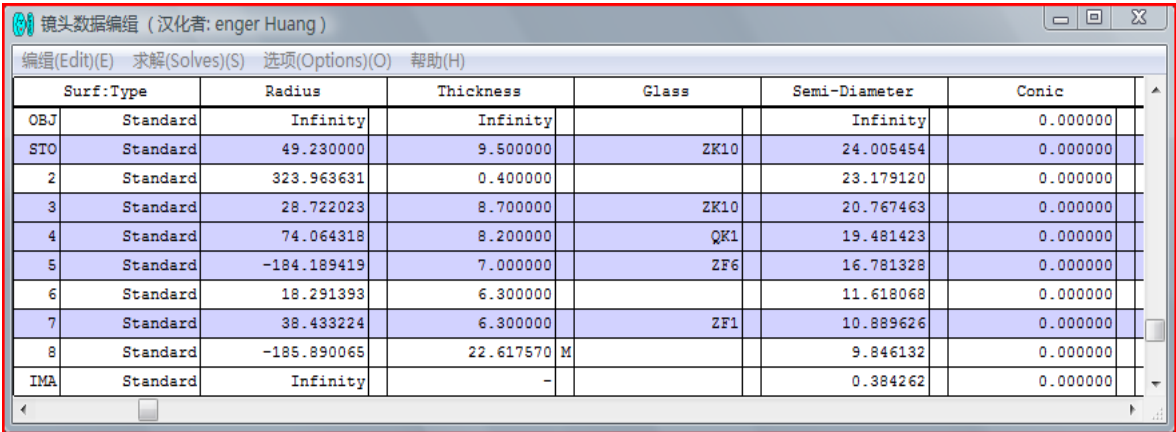
表 3.7 ZEMAX 的 Lens Data Editor 中已经输入的天线的原始结构数据



Surf	Type	Comment	Radius	Thickness	Glass	Semi-Diameter
OBJ	Standard		Infinity	Infinity		Infinity
STO	Standard		41.690000	7.800000	ZK10	17.003163
2	Standard		274.312000	0.400000		16.224155
3	Standard		24.320000	7.400000	ZK10	15.012712
4	Standard		62.713000	7.000000	QK1	13.441690
5	Standard		-155.960000	6.000000	ZF6	11.117849
6	Standard		15.488000	9.800000		8.076601
7	Standard		32.542000	5.500000	ZF1	6.662067
8	Standard		-157.400000	16.657686	M	5.783762
IMA	Standard		Infinity	-		0.128251

选择“Tools → Make Focal → 输入数据”中输入 60，后选择“OK”，完成焦距缩放，并将厚度（Thickness）一栏数据归整后，得到优化前的初始结构数据见表 3.8 所示。

表 3.8 焦距缩放后成 60 的初始结构数据



Surf	Type	Radius	Thickness	Glass	Semi-Diameter	Conic
OBJ	Standard	Infinity	Infinity		Infinity	0.000000
STO	Standard	49.230000	9.500000	ZK10	24.005454	0.000000
2	Standard	323.963631	0.400000		23.179120	0.000000
3	Standard	28.722023	8.700000	ZK10	20.767463	0.000000
4	Standard	74.064318	8.200000	QK1	19.481423	0.000000
5	Standard	-184.189419	7.000000	ZF6	16.781328	0.000000
6	Standard	18.291393	6.300000		11.618068	0.000000
7	Standard	38.433224	6.300000	ZF1	10.889626	0.000000
8	Standard	-185.890065	22.617570	M	9.846132	0.000000
IMA	Standard	Infinity	-		0.384262	0.000000

这样系统的焦距就为 $f' = 60.1075\text{mm}$ ， $D/f' = 1 / 1.234$ ，总长等于 69.0176，系统弥散圆很大，如图 3.6 所示，半径为 $330.4\mu\text{m}$ 和 $331.8\mu\text{m}$ ，明显需要进行优化，改善成像质量。

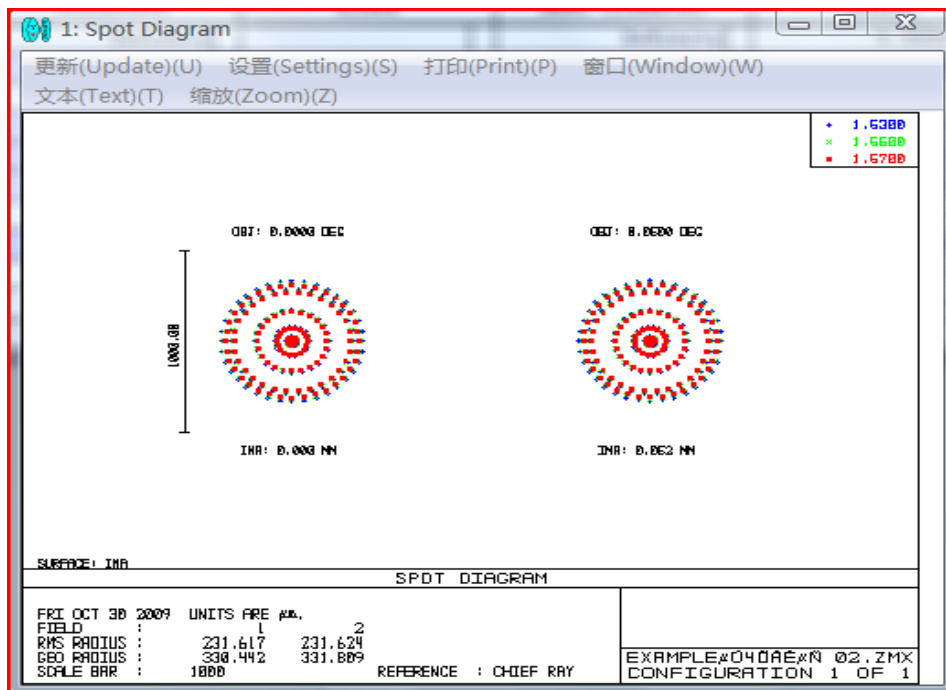


图 3.6 初始结构的点列图

4. 优化设计

该结构形式可以用做优化变量的数据有：8 个曲率半径，第 6 个空气间隔，必要时还可以将玻璃作为变量。要校正的像差有 6 个：即球差 $\delta L'_m$ 、轴向色差 $\Delta L'_{FC}$ 、 SC'_m 、 $\delta L'_{sm}$ 、色球差 $\delta L'_{FC}$ 和 SC'_{sm} ，同时需要控制焦距 $f' = 60\text{ mm}$ ，因此该系统具有很好校正上述像差的能力。将 8 个曲率半径设为变量——将鼠标选中第 1 个曲率半径，按“CTRL+Z”一次（连接两次，表示取消设置变量），该曲率半径栏后带有“v”字样，表示该曲率半径已经被设置成为变量，依次将其余 7 个曲率半径都设置成变量。

(1) 使用 Default Merit Function 建立缺省评价函数进行优化

选择“Editors → Merit Function → 打开评价函数编辑器”，在第 1 行中先输入 EFFL，第 2,3 行中输入 OPLT、OPGT 控制焦距范围，再选择“Tools → Default Merit Function → Spot Radius → Start”中输入 4，再选择“OK”，可以建立缺省评价函数。

将 Lens Data Editor 中第 1~8 个曲率半径设置成变量后，从主菜单中选择 Tools → Optimization → Automatic”（或从桌面上选择“Opt”快击键），ZEMAX 将进行优化设计，评价函数从 0.110042568 下降到 0.00271126，此时点列图等像质指标得到很大改善。点列图如图 3.7 所示，其中最大点列图弥散半径减少到 $27.394\mu\text{m}$ ，MTF 得到很大提高，如图 3.8 所示，在空间频率 50lp/mm 处，MTF 达到 0.5，已经基本符合设计要求。优化后的结构参数如表 3.9 所示，镜头示意图如图 3.9 所示

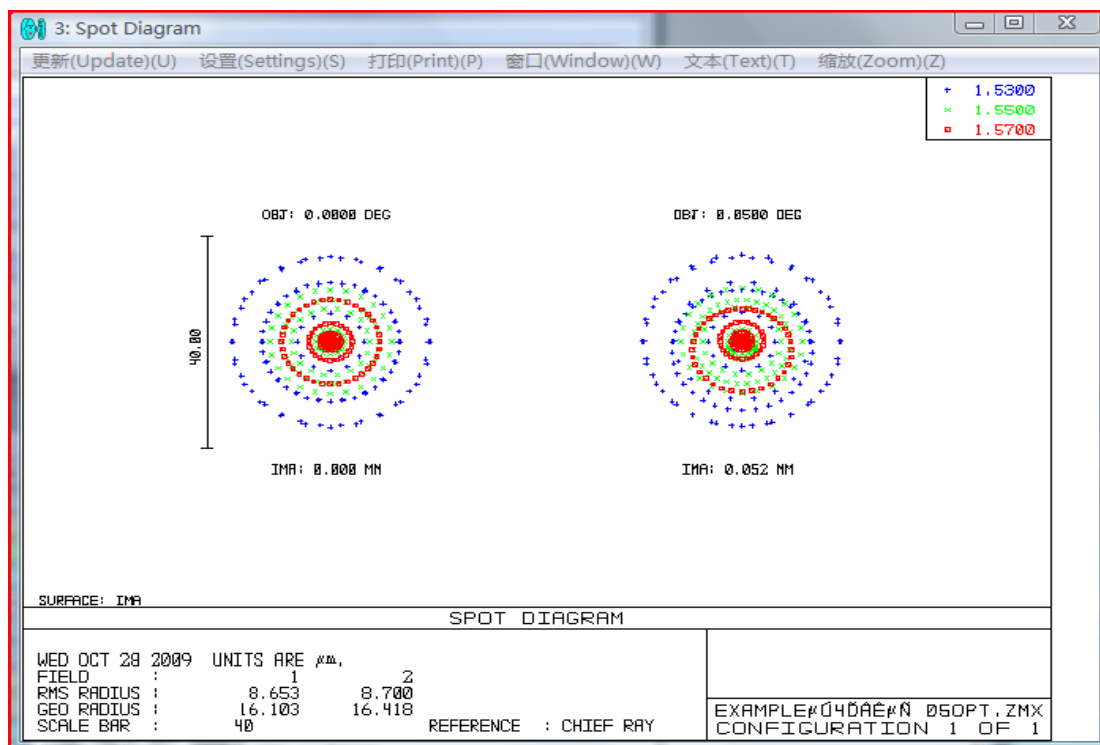


图 3.7 用缺省评价函数优化后结构的点列图

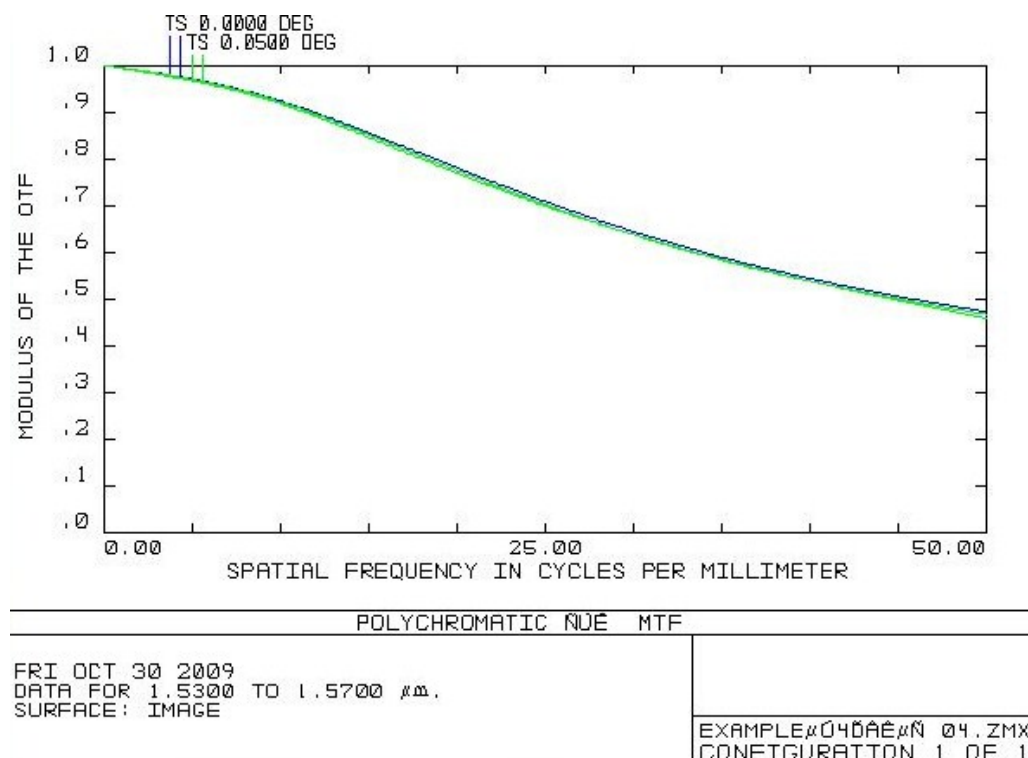


图 3.8 用缺省评价函数优化后结构的 MTF 曲线

表 3.9 缺省评价函数优化后的结构参数

Surf	Type	Comment	Radius	Thickness	Glass	Semi-Diameter
OBJ	Standard		Infinity	Infinity		Infinity
STO	Standard		67.000000	V 9.300000	SK10	24.003881
2	Standard		-258.000000	V 0.400000		23.468580
3	Standard		33.870000	V 9.400000	SK10	20.911764
4	Standard		262.900000	V 8.800000	QK1	19.572162
5	Standard		-92.000000	V 7.300000	SF4	16.197079
6	Standard		18.628462	V 6.300000		11.439815
7	Standard		15.100000	V 6.300000	SF12	10.596167
8	Standard		28.600000	V 20.611417	M	9.157940
IMA	Standard		Infinity	-		0.264720

光学特性参数为： $L=\infty$ ， $f'=58.98\text{mm}$ ， $D/f'=1/1.2$ ， $2\omega=\pm 0.1^\circ$ ，工作中心波长为 $1.55\mu\text{m}$ ，激光波长漂移： $1.53\mu\text{m}\sim 1.57\mu\text{m}$ ，空间光阑在第 1 面上。

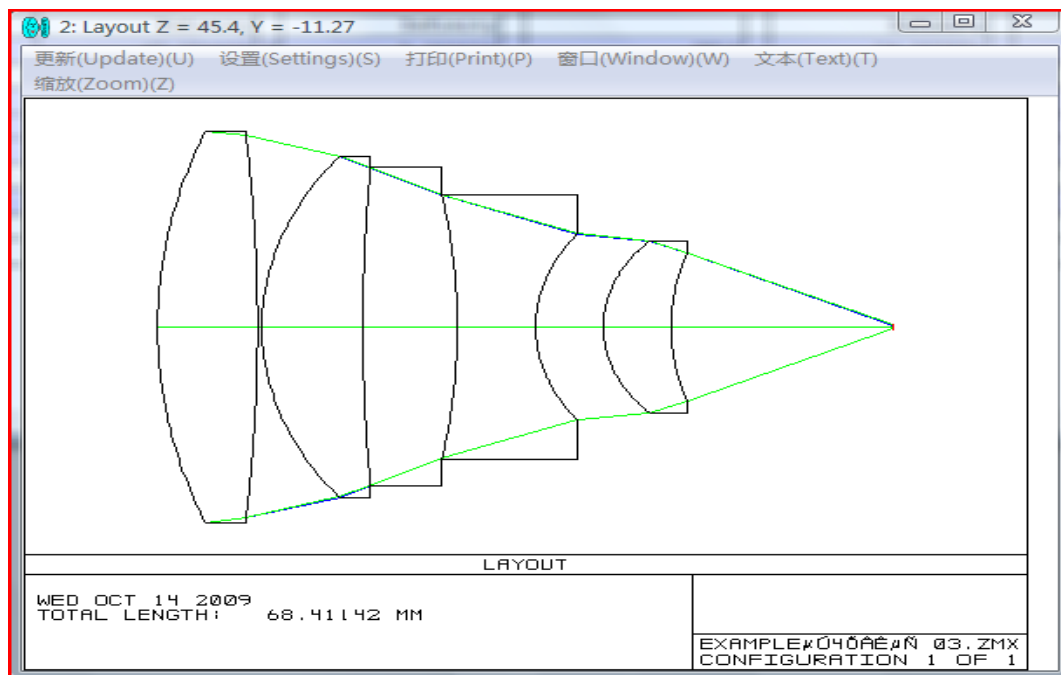


图 3.9 光学接收天线示意图

(2) 用自建的独立几何像差评价函数优化

如前所述，要校正的像差有 6 个，即 $\delta L'_m$ 、 $\Delta L'_{FC}$ 、 SC'_m 、 $\delta L'_{sn}$ 、色球差 $\delta L'_{FC}$ 和 SC'_{sn} ，同时需控制焦距 $f'=60\text{mm}$ 。应用 3.2 节阐述的控制像差评价函数建立方法，构建评价函数如表 3.10 所示，其中操作符第 1~5 用于控制焦距与系统总长；操作符 7~12 定义 $\delta L'_m$ ，操作符 12 加上权因子控制 $\delta L'_m$ ；操作符 14~16 控制正弦慧差 SC'_m ；操作符 18~24 控制 0.707 孔径的轴向色差 $\Delta L'_{FC}$ ，操作符 26~33 控制高级球差 $\delta L'_{sn}$ ；操作符 35~38 控制高级正弦慧差 SC'_{sn} ；操作符 40~50

控制高级色球差 $\delta L'_{FC}$ ；操作符 52~57 控制边界条件；操作符 59~62 控制玻璃变量边界条件。

优化后的结构参数经归整后如表 3.11 所示

表 3.10 自建的像差优化设计评价函数

评价函数编辑: 3.863482E-003										
编辑(Edit)(E) 工具(Tools)(T) 帮助(H)										
Oper #	Type	Op#					Target	Weight	Value	
1	EFFL			2			0.000000	0.000000	59.019293	
2	OPLT	OPLT	1				61.000000	1.000000	61.000000	
3	OPGT	OPGT	1				59.000000	1.000000	59.000000	
4	ITHI	ITHI	1	8			0.000000	0.000000	70.001603	
5	OPLT	OPLT	4				70.000000	0.000000	70.001603	
6	BLNK	BLNK	control spherical aberration for whole aperture							
7	BLNK	BLNK								
8	TRAY	TRAY		2	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000	0.000000	-1.68894E-003
9	RAGC	RAGC	8	2	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000	0.000000	0.913575
10	ACOS	ACOS	9	1			0.000000	0.000000	23.995886	
11	TANG	TANG	10	1			0.000000	0.000000	0.445143	
12	DIVI	DIVI	8	11			0.000000	5.000000	-3.79416E-003	
13	BLNK	BLNK	control sinuoidal coma							
14	TRAY	TRAY		2	0.000000	1.000000	1.000000	0.000000	0.000000	-1.76258E-008
15	PIMH	PIMH		2			0.000000	0.000000	0.051504	
16	DIVI	DIVI	14	15			0.000000	1000.000000	-3.42222E-007	3.84
17	BLNK	BLNK	control axial color							
18	TRAY	TRAY		1	0.000000	0.000000	0.000000	0.707100	0.000000	-0.016721
19	TRAY	TRAY		3	0.000000	0.000000	0.000000	0.707100	0.000000	-3.31372E-003
20	CONS	CONS					0.707000	0.000000	0.707000	
21	PROD	PROD	11	20			0.000000	0.000000	0.314716	
22	DIVI	DIVI	18	21			0.000000	0.000000	-0.053131	
23	DIVI	DIVI	19	21			0.000000	0.000000	-0.010529	
24	DIFF	DIFF	22	23			0.000000	5.000000	-0.042602	
25	RAGC	RAGC	8	2	0.000000	0.000000	0.000000	0.707000	0.000000	0.957945
26	ACOS	ACOS	25	1			0.000000	0.000000	16.675540	
27	TANG	TANG	26	1			0.000000	0.000000	0.299549	
28	DIVI	DIVI	18	27			0.000000	0.000000	-0.055822	
29	DIVI	DIVI	19	27			0.000000	0.000000	-0.011062	
30	DIFF	DIFF	28	29			0.000000	5.000000	-0.044753	
31	BLNK	BLNK	high order spherical aberration							
32	TRAY	TRAY		2	0.000000	0.000000	0.000000	0.707000	0.000000	-0.010050
33	RAGC	RAGC	8	2	0.000000	0.000000	0.000000	0.707000	0.000000	0.957945
34	ACOS	ACOS	33	1			0.000000	0.000000	16.675540	
35	TANG	TANG	34	1			0.000000	0.000000	0.299549	
36	DIVI	DIVI	32	35			0.000000	0.000000	-0.033552	
37	CONS	CONS					0.500000	0.000000	0.500000	
38	PROD	PROD	12	37			0.000000	0.000000	-1.89708E-003	
39	DIFF	DIFF	36	38			0.000000	5.000000	-0.031655	1
40	BLNK	BLNK	high order sinuoidal coma							
41	TRAY	TRAY		2	0.000000	1.000000	0.707000	0.000000	0.000000	1.289492E-004
42	DIVI	DIVI	41	15			0.000000	0.000000	2.503670E-003	
43	PROD	PROD	37	16			0.000000	0.000000	-1.71111E-007	
44	DIFF	DIFF	42	43			0.000000	1000.000000	2.503841E-003	2
45	BLNK	BLNK	high chromatic spherical aberration							
46	TRAY	TRAY		1	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000	0.000000	-0.011235
47	TRAY	TRAY		3	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000	0.000000	7.952711E-003
48	DIVI	DIVI	46	11			0.000000	0.000000	-0.025239	
49	DIVI	DIVI	47	11			0.000000	0.000000	0.017866	
50	DIFF	DIFF	48	49			0.000000	0.000000	-0.043104	
51	BLNK	BLNK	axcl results error by -1							
52	AXCL	AXCL	0	0	0.000000			0.000000	0.000000	0.045028
53	CONS	CONS						-1.000000	0.000000	-1.000000
54	PROD	PROD	52	53				0.000000	0.000000	-0.045028
55	BLNK	BLNK								
56	DIFF	DIFF	50	54				0.000000	10.000000	1.923324E-003
57	BLNK	BLNK	boundary control							
58	MNCA	MNCA	1	7				0.200000	1.000000	0.200000
59	MXCA	MXCA	1	7				10.000000	1.000000	10.000000
60	MNEA	MNEA	1	7				1.000000	1.000000	1.000000
61	MNCG	MNCG	1	7				1.500000	1.000000	1.500000
62	MKCG	MKCG	1	7				15.000000	1.000000	15.000000
63	MNCE	MNCE	1	7				2.000000	1.000000	2.000000
64	BLNK	BLNK	control glass							
65	MNIN	MNIN	1	7				1.460000	1.000000	1.460000
66	MKIN	MKIN	1	7				1.610000	1.000000	1.610000
67	MNAB	MNAB	1	7				25.000000	1.000000	25.000000
68	MXAB	MXAB	1	7				54.000000	1.000000	54.000000

表 3.11 用自建的像差优化评价函数优化归整的结构参数

镜头数据编辑 (汉化者: enger Huang)						
编辑(Edit)(E) 求解(Solves)(S) 选项(Options)(O) 帮助(H)						
Surf	Type	Radius	Thickness	Glass	Semi-Diameter	
OBJ	Standard	Infinity	Infinity		Infinity	
STO	Standard	65.200000	V 9.500000	ZK10	24.003996	
2	Standard	-213.700000	V 0.400000		23.475133	
3	Standard	33.720000	V 8.700000	ZK10	20.697541	
4	Standard	99.000000	V 8.200000	QK1	19.061944	
5	Standard	-123.800000	V 7.000000	ZF6	16.404008	
6	Standard	17.370000	V 6.300000		11.593952	
7	Standard	15.830000	V 6.300000	ZF1	11.129360	
8	Standard	35.400000	V 23.601603	M	9.920748	
IMA	Standard	Infinity	-		0.061336	

光学特性参数为: $L = \infty$, $f' = 59.01\text{mm}$, $D/f' = 1/1.23$, $2\omega = \pm 0.1^\circ$, 工作中心波长为 $1.55\mu\text{m}$, 激光波长漂移: $1.53\mu\text{m} \sim 1.57\mu\text{m}$, 孔径光阑在第 1 面上。对应的点列图如图 3.10 所示, 最大弥散圆半径为 $16.41\mu\text{m}$, 从数值上看, 比用弥散圆优化的数值小; 该天线的 MTF 曲线如图 3.11 所示, 由该图看出, 在空间频率 50lp/mm 范围内, MTF 曲线比弥散圆优化的结果差

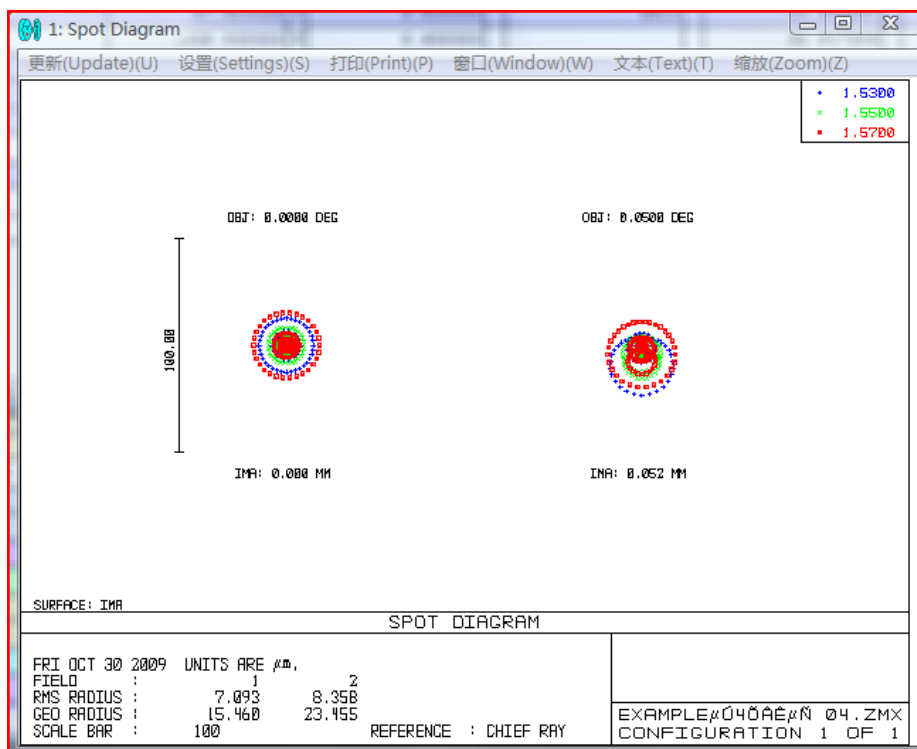


图 3.10 自建像差评价函数优化结果的点列图

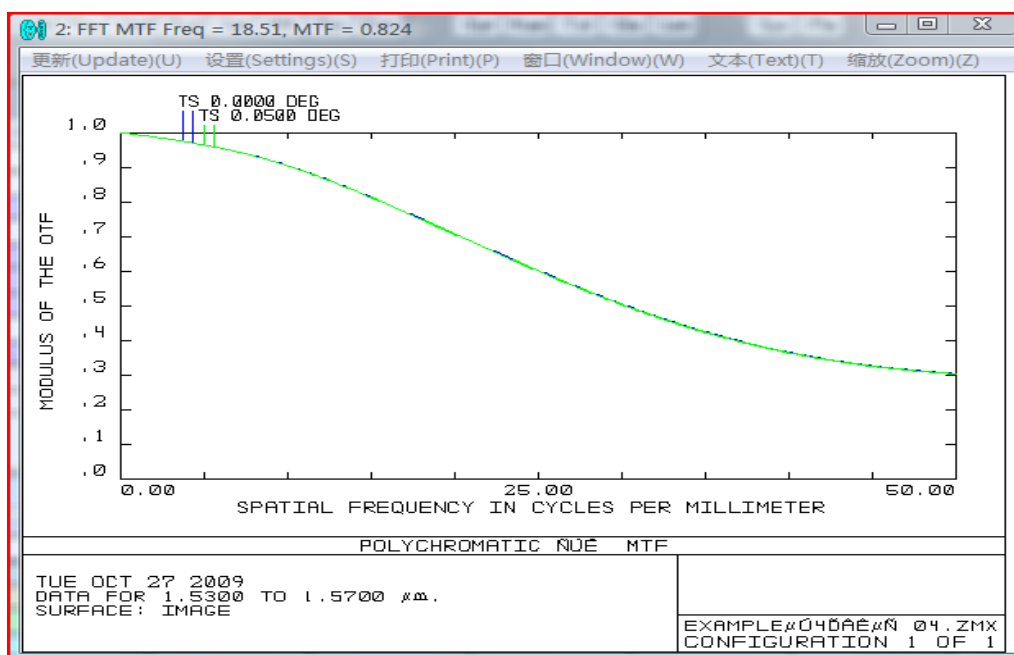


图 3.11 自建像差评价函数优化结果的 MTF

5. 优化方式比较与分析

由上面的优化结果可以看出，缺省评价函数与自建的像差优化评价函数都能有效的减小像差。但对本例设计要求，前者比后者要好些；如要后者进一步提高，可以改用 MTF 构建评价函数，在作些优化。

本例中，影响像质的主导像差是高级孔径像差，轴外视场不大，几乎与轴上具有相同的成像质量。二者结果的差别，可以通过二者的球差曲线来分析。用弥散圆优化后的球差曲线，如图 3.12 所示，用像差优化后的球差曲线，如图 3.13 所示

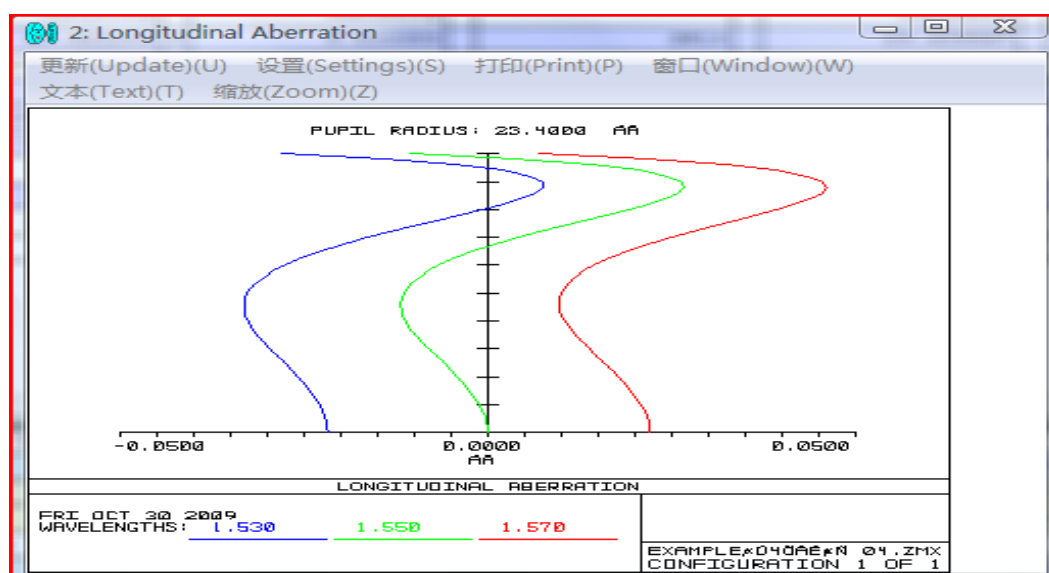


图 3.12 缺省评价函数优化后的球差曲线

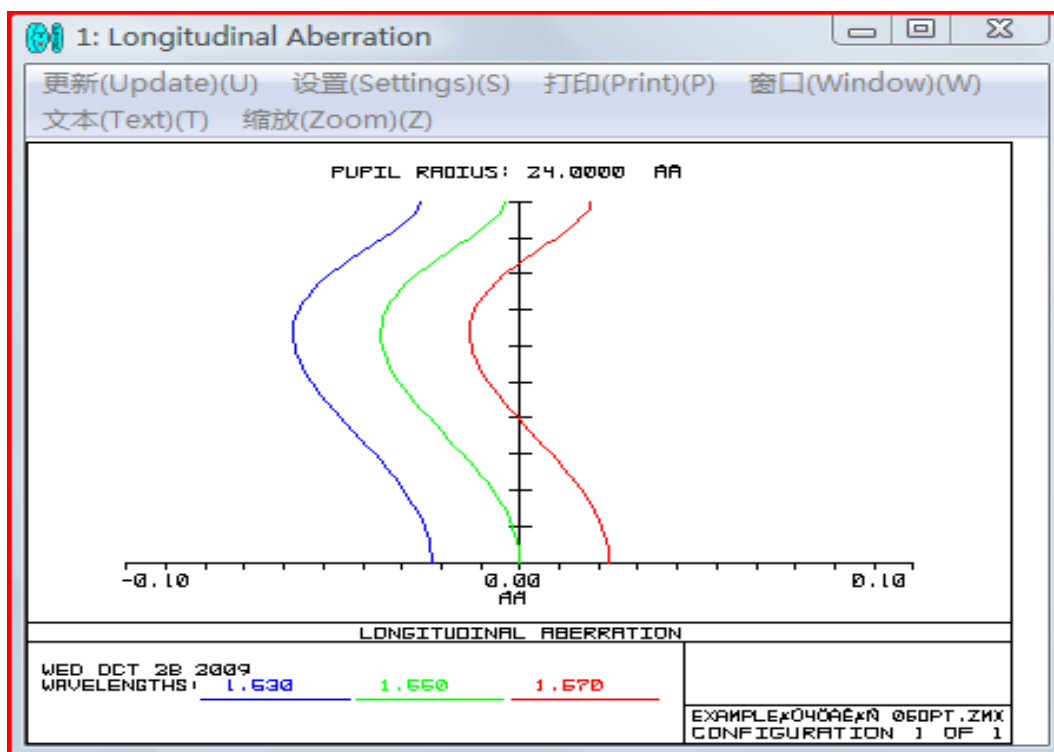


图 3.13 自建像差评价函数优化后的球差曲线

两种球差的状态反映了不同的设计思想，图 3.12 的球差状态， $1.0h$ 的球差不为零， $0.707h$ 的球差接近于零，表示优先平衡小孔径的像差；图 3.13 的球差状态， $1.0h$ 的球差接近零， $0.707h$ 的球差残留较大，反映了先校正初级球差再校正高级像差的思想。本例是一自由空间光通信接收光学天线，希望接收的弥散圆愈小愈好，因此用弥散圆优化结果会好一些。如果要改善像差的设计结果，可以改校正 $0.707h$ 的球差和高级球差。

通过本例，需要我们理解下列几点：

- (1) 通过自建像差评价函数，可以利用 ZEMAX 实现基于像差的光学设计思想；与过去的像差理论知识紧密结合。
- (2) 像差设计可以校正不同孔径、不同视场的所有像差，具备很大的变化空间，可以满足任何设计思想的需要。
- (3) 像差设计还可以与其他像质指标设计组合，构成评价函数。

第四章 像差设计实例

理论结合实际，勤加练习，才能学好 ZEMAX 软件在光学设计中的应用。本章内容为介绍应用 ZEMAX 软件进行光学设计，举例设计一个典型光学系统，让大家（1）掌握不同光学系统光学设计的像差校正方案；（2）学会使用 ZEMAX 定义不同光学特性光学系统的方法与像质评价技术；（3）学会使用 ZEMAX 进行像差设计或像差与其他控制的组合设计方法。

4.1 望远镜物镜或准直物镜的设计

4.1.1 双胶合望远透镜的设计

1. 设计要求：

焦距： $f'=250\text{ mm}$

通光孔径： $D=40\text{ mm}$

视场角： $2\omega=6^\circ$ ，工作中心波长为 $1.55\mu\text{m}$ ，

入瞳与物镜重合，

物镜后棱镜系统的总厚度为 150 mm ，要求：

$\delta L'_m=0.1\text{ mm}$ ， $SC'_m=-0.001$ ， $\Delta L'_{FC}=0.05\text{ mm}$

2. 初级像差理论 PW 算法，求解得到初级结构，参数为

r	d	玻璃
153.1	6	K9
-112.93	4	ZF1
-361.68	50	
∞	150	K9
∞		

按照此结构参数，得到 $f'=251.076\text{ mm}$ ，球差 $\delta L'_m=-0.074\text{ mm}$ 。

对于正弦差 $SC'_m=-0.00063$ ，ZEMAX 没有直接数据，可以通过其他数据来估计：

（1）用 Ray Aberration 中弥散圆的大小：由下列顺序

“Ray Aberration → Fans → Setting → Sagittal → Y aberration → Text” 得到

$$SC'_m = \frac{K'_s}{y'} = \frac{-8.3832}{y'} = 0.00064$$

（2）用控制符 COMA 计算出的值估计

$1.021271 \times 0.00058765 = 0.0006$ （注意无正负，不确切），而轴向色差 $\Delta L'_{FC}$ 由球差曲线获得：

$$\Delta L'_{FC 1.0h} = 0.1709 + 0.01812 = 0.19\text{ mm}$$

$$\Delta L'_{FC} = 0.1334 - 0.099 = 0.0344\text{ mm}$$

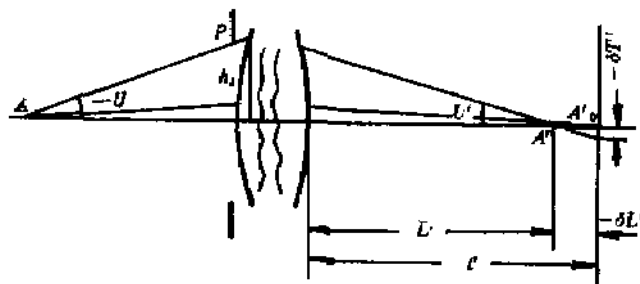
通常情况下, $\Delta L'_{FC}$ 采用 $0.707h$ 的轴向色差, 大小为,

$$\Delta L'_{FC 0.707h} = 0.1333 - 0.02457 = 0.1087 \text{ mm}。$$

3. 比较后实际像差数据与目标值有差别, 有必要进行再优化

我们要把像差控制在: $f'=250 \text{ mm}$, $\delta L'_m=0.1 \text{ mm}$, $SC'_m=-0.001$, $\Delta L'_{FC}=0.05 \text{ mm}$, 但 ZEMAX 中没有这些像差的专门操作符, 如何实现这些像差的控制?

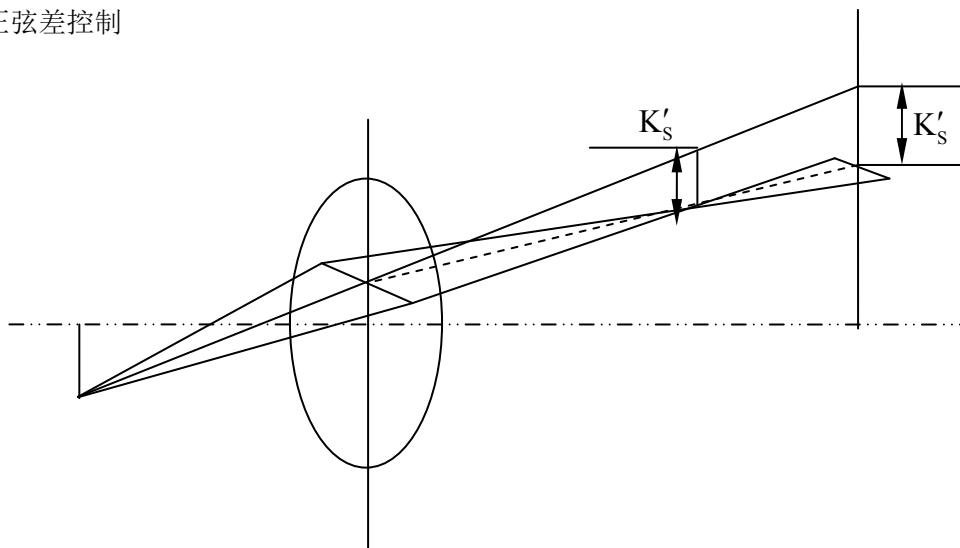
(A) 球差控制



$$\delta L' = \frac{\Delta T}{\tan \theta}$$

ΔT 从 TRAY 给出, $\tan \theta$ 由该光线的方向余弦操作符 RAGC ($P_y=1.0$) $\rightarrow$ 经反余弦函数操作符 ACOS $\rightarrow$ 再求正切值 TANG 得出; 最后由算术除法操作符 DIVI 求 $\delta L'$ 。

(B) 正弦差控制



K'_s 由垂轴的几何像差 TRAY ($H_y=1.0$, $P_x=1.0$); y' 由 PIMH 直接给出;

$$SC' = \frac{K'_s}{y'};$$

(C) 轴向色差控制

控制方法如下:

TRAY ($wav=1$, $P_y=0.7071$);

TRAY (wav=3, P_y=0.7071);

DIVI [TRAY (wav=1, P_y=0.7071) / tanθ (wav=2)];

DIVI [TRAY (wav=3, P_y=0.7071) / tanθ (wav=2)];

DIFF;

找到控制像差的方法后，优化设计采用自适应原理方法。

自适应方法有控制像差数目必须小于自变量数目的基本要求，故先不控制球差，只控制焦距、轴向色差、正弦差，选定三个曲率半径为变量进行第一次优化。然后，再通过选换玻璃的方法来控制球差（用初级像差解决）。

第一次优化后新系统的结构参数是：

r	d	玻璃
145.812	6	K9
-120.3064	4	ZF1
-413.5847	50	
∞	150	K9
∞	96.08	

$$f'=250 \text{ mm}, \delta L'_m = -0.222 \text{ mm}, \Delta L'_{FC} = 0.05018, SC'_m = -0.001$$

此时的球差值 $\delta L'_m = -0.222 \text{ mm}$ ，而要求的目标值为 0.1，所以接下来要用更换玻璃的方法来控制球差。

● 方法一：

根据初级像差公式

$$S_1 = -2n'u'^2 \delta L' = hP = h^4 \varphi^3 \bar{P};$$

两边对 $\delta L'$ 和 $\bar{P}$ 微分有：

$$-2n'u'^2 (\Delta \delta L'_m) = h^4 \varphi^3 \Delta \bar{P}$$

$$\Delta \bar{P} = \frac{-2n'u'^2 (\Delta \delta L')}{h^4 \varphi^3}$$

在保持物方孔径角 $\bar{u}_1$, $\bar{W}$ 不变的条件下更换玻璃，则 $\Delta P = \Delta \bar{P}_\infty = \Delta P_0$ 。

$$\bar{P}_\infty = P_0 + 2.35(Q - Q_0)^2;$$

因为 $\bar{W}_\infty = -1.67(Q - Q_0) + 0.15;$

$$u' = h\varphi \quad n' = 1.0;$$

$$\delta L' = 0.1 - (-0.222) = 0.322;$$

$$\text{有} \quad \Delta P_0 = \frac{-2n'u'^2 (\Delta \delta L)}{h^4 \varphi^3} = \frac{-2(\Delta \delta L)}{h^2 \varphi} = \frac{-2 \times 0.322}{20^2 \times \frac{1}{250}} = -0.4025。$$

$$P_0^* = P_0 + \Delta P_0 = 0.13 + (-0.4025) = -0.2725$$

因为色差不便，所以 $\bar{C}$ 不变， $\bar{C} = 0.0019$ 。按 $\bar{C} = 0.0019$ ， $P_0 = -0.2725$ 查参考文献 1 中的 P271-280 的玻璃表：

$$\frac{0.0019-0}{0.01-0} = \frac{-0.2725-P_1}{P_2-P_1} \Rightarrow P_2 = -4.263P_1 - 1.434$$

如选 **K9-ZF1**，则 $0.19 \neq \frac{-0.2725 - (-0.28)}{1.89 + 0.28} = 0.0034$

按大致 -4.263 分： P_2 和 P_1 不同号，差 4.26 倍，或者 $\frac{P_2 + 1.434}{P_1} = -4.263$

查玻璃表得：

② BaK2-ZF1 $P_0 = 0.19 \times [1.67 - (-0.72)] + (-0.72) = -0.2659$

② BaK7-ZF2 $P_0 = 0.19 \times [1.50 - (-0.60)] + (-0.60) = -0.201$

显然第一组相差不大，因此玻璃换为：BaK2-ZF1，重新优化还是不控制球差，优化后的结构参数为：

r	d	玻璃
150.475	6	BaK2
-109.6296	4	ZF1
-459.7798	50	
∞	150	K9
∞	95.9943	

在上述结构下的焦距与像差实际值与目标值如下：

实际值	目标值
$f' = 250 \text{ mm}$	250
$l' = 95.99 \text{ mm}$	
$\delta L'_m = 0.0745$	0.1
$SC'_m = -0.001$	-0.001
$\Delta L'_{FC} = 0.05$	0.05

其中球差的实际值和目标值相差 0.0255，小于公差 0.34mm。（公差 = $\frac{4 \times 0.00055}{(20/250)^2} = 0.34$ ）

设计过程可以得到：

(1) 初级像差理论在整个设计过程中仍有重要的知道意义。

(2) 学会如何利用 ZEMAX 进行传统像差补偿的设计方法。

(3) 模拟自适应法的过程

利用自动设计程序，加上像差理论的指导，可以使光学设计完成的又快又好。

● 方法二：

将玻璃材料 K9、ZF1 设为变量，评价函数中 $\delta L'_m$ 加入权因子，并且限制玻璃变化范围：

MNIN, MXIN、MNAB、MXAB。

(1) 仅将 K9 作为变量，ZF1 不变

经优化后，K9 自动变为 K16，因 K16 不常用，可以选 BaK2。

(2) 将 K9 和 ZF1 均设为变量

最后得到玻璃配对：K9—ZBaF4，结果较差。

结论：玻璃的选配没有定式。

4.1.2 大相对孔径的望远物镜的设计

大相对孔径的光学系统设计，要涉及到跟孔径有关的高级像差的校正，孔径有关的轴外高级孔径像差概念，参看第 3 章 3.2.3 节内容，下面补充需要用到的高级像差：

(1) 初级像差与 y' , h 的关系：

$$\delta L' = a_1 h^2,$$

$$K'_s = a_2 h^2 y,$$

$$x'_t = a_3 y^2,$$

$$x'_s = a_4 y^2,$$

$$\delta y'_z = a_5 y^3,$$

$$\Delta l'_{FC} = C_1,$$

$$\Delta y'_{FC} = C_2 y。$$

(2) 高级像差

① 高级球差

0.7071h 和 1.0h 的球差之间的关系：

$$\delta L'_{0.7071h} = a_1 (0.7071)^2 = \frac{1}{2} a_1 h^2 = \frac{1}{2} \delta L'_{1h}$$

高级球差的定义： $\delta L'_{sn} = \delta L'_{0.7071h} - \frac{1}{2} \delta L'_{1h}$ ，如为初级球差，则 $\delta L'_{sn} = 0$ 。

② 高级慧差 $SC'_{sn} = SC'_{0.7071h} - \frac{1}{2} SC'_{1h}。$

③ 色球差 $\delta L'_{FC} = \Delta L'_{FC(1h)} - \Delta l'_{FC(0h)} \circ$

1. 大相对孔径的望远镜物镜的涉及要求:

$$f' = 120 \text{ mm},$$

$$D = 50 \text{ mm}, \quad D/f' = 1/2.4,$$

$$2\omega = 4^\circ,$$

$$\text{入瞳与物镜重合 } l_z = 0 \circ$$

视场角 $2\omega = 4^\circ$ 不大, 但 $D/f' = 1/2.4$, 双胶合不能满足要求。需选用双胶合加单透镜结构。查阅参考文献 2 手册得到:

r	d	玻璃
82.2	5.5	K9
-57.81	3	ZF1
-4742	2.8	
71.45	3.5	K9
∞		

$$f' = 120 \text{ mm}, \quad D/f' = 1/3.2, \quad 2\omega = 2^\circ, \quad \text{入瞳与物镜重合 } l_z = 0 \circ$$

2. 设计步骤:

(1) 上述系统的焦距与设计要求差很多, 首先要把结构参数缩放到 $f' = 120 \text{ mm}$

① Tools → 第六格 Make Focal

② 归整入瞳直径: $H=25 \text{ mm}$

③ 适当加大厚度 (因孔径增大)

然后修改前面的评价函数, 得到初级像差值:

$$f' = 119.3 \text{ mm}, \quad \delta L'_m = 0.2186 \text{ mm}, \quad SC'_m = -0.000915, \quad \Delta L'_{FC} = -0.0506,$$

$$\Delta l'_{FC} = 0.228, \quad x'_{tm} = -0.26 \text{ mm}, \quad x'_{sm} = -0.122 \text{ mm} \circ$$

(2) 第一阶段像差校正

① 变量有 5 个: 5 个曲率半径;

首先校正初级像差, 然后再看高级像差。

② 边界条件

面号	1	2	3	4
$d_{\min} (\text{mm})$	3	5	0.2	2.5

表中面号 1 对应的 $d_{\min}$ 实际上是第一个正透镜的边缘最小厚度。后面序号 2, 3 对应一个负透镜的中心厚度和空气间隔, 它们直接等于原始系统的值, 这是我们已选定了的。第 4 个为最后一个正透镜的边缘最小厚度。

③ 权因子

优化后, 主要像差为: (结合曲线看评价函数)

像差参数	f'	$\delta L'_m$	SC'_m	$\Delta L'_{FC}$	x'_{tm}	x'_{sm}	$\delta L'_{sn}$	SC'_{sn}	$\delta L'_{FC}$
Value	120	0	0	0	-0.259	-0.121	-0.06	0.00025	0.167

球差的公差是： $\delta L'_m \leq \frac{4 \times 0.00055}{(1/4.8)^2} = 0.05 \text{ mm}$ 。

结果显示，要求校正的初级像差都已经达到目标值，但是三种高级像差或剩余像差为：

$\delta L'_{sn} = -0.06$ 处于边界

$\delta L'_{FC} = 0.167$ 较大，需校正

$SC'_{sn} = 0.00037$ 较小，无须校正

(3) 第二阶段像差校正（主要校正高级像差）

从结构来看为双胶合+单透镜结构，单透镜本身不能校正色差和球差，要靠前面的双胶合透镜组，总体要求希望双胶合产生的像差越小越好。通常，在光线结构相同的情况下，**玻璃的折射率越大，球差越小，色散系数越小，色差越小**。K9，色散系数很低（ $n_d=1.5163$ ， $v_d=64.1$ ），但折射率小，所以可以将 K9 改成 ZK1。评价函数不变，重新校正。

新结构参数为：

r	d	玻璃
203.29	10.26	K9
-64.258	5.0	ZF1
-711.31	0.2	
89.65	6.0	ZK1
-791.84		

新结构的主要像差：

像差参数	f'	$\delta L'_m$	SC'_m	$\Delta L'_{FC}$	x'_{tm}	x'_{sm}	$\delta L'_{sn}$	SC'_{sn}	$\delta L'_{FC}$
Value	120	0	0	0	-0.257	-0.121	0.056	0.000371	0.154

从结果看高级像差略有减少，不显著，可作为下阶段像差自动校正的原始系统。

- ① 加入高级像差校正要求——权因子。
- ② 变量不够，需将玻璃作为变量，并限制边界条件。
- ③ 增大原初级像差的权因子，以表示初级的重要性。

优化后，按玻璃找到实际牌号：

$n_d=1.48$ ， $v_d=64.2 \rightarrow K9$

$n_d=1.82$ ， $v_d=28.5 \rightarrow ZF7$

将厚度值 $10.26 \rightarrow 10.5$ ，重新优化，结果为：

r	d	玻璃
184.84	10.5	K9
-97.97	5.0	ZF7
-291.84	0.2	
81.67	6.0	ZK1
488.71		

像差情况:

像差参数	f'	$\delta L'_m$	SC'_m	$\Delta L'_{FC}$	x'_{tm}	x'_{sm}	$\delta L'_{sn}$	SC'_{sn}	$\delta L'_{FC}$
Value	120.003	0.0013	0	0	-0.265	-0.123	-0.014	0.00018	0.092

其中高级像差: $\delta L'_{sn}$ 由 $-0.052 \rightarrow -0.014$; 色球差 $\delta L'_{FC}$ 由 $0.154 \rightarrow 0.092$, 已经下降很多, 基本达到设计要求。

最后进行规范半径 (参考文献 2 中 P147~159), 尽量采用黑体字。规整后结构数据为:

r	d	玻璃
184.5	10.7	K9
-97.95	5.2	ZF7
-291.1	0.2	
81.66	6.6	ZK1
483.1		

像差情况为:

像差参数	f'	$\delta L'_m$	SC'_m	$\Delta L'_{FC}$	x'_{tm}	x'_{sm}	$\delta L'_{sn}$	SC'_{sn}	$\delta L'_{FC}$
Value	120	0.0065	0	0	-0.265	-0.123	-0.145	0	0.092

3. 设计完成, 总结如下:

- (1) 大孔径或大视场的光学系统的设计难点是高级像差的校正, 结构复杂。
- (2) 必须在校正初级像差的基础上校正高级像差。
- (3) 高级像差很难校正到零。

同时在一定的相对孔径和视场角下, 焦距增加剩余像差要按比例增大, 所以焦距越长, 所用的相对孔径和视场角要减小。

- (4) **玻璃材料作为自变量是校正高级像差的重要手段**, 但必须限制边界。更换玻璃要有利于高级像差的减小, 同时要注意尽量采用常用的玻璃。

4.1.3 摄远型物镜设计

设计一个摄远物镜，光学特性要求如下：

焦距： $f' = 250 \text{ mm}$

通光孔径： $D = 50 \text{ mm}$

视场角： $2\omega = 2^\circ$

系统总长度：小于 165 mm

- 摄远物镜的特征：
 - (1) 焦距长于筒长；
 - (2) 焦距越长，放大倍率越高。
- 摄远物镜的主要用途：经纬仪、水平仪。
- 摄远型物镜由正组和负组组成：

由 $\varphi'_1 + \varphi'_2 - d\varphi'_1\varphi'_2 = \varphi'$

和 $\frac{d}{f'_1} = 1 - \frac{l'_f}{f'}$
 $d + l'_f < 165$

及 $\frac{1}{l'_f} - \frac{1}{f'_1 - d} = \frac{1}{f'_2}$

四方程组用来求解外型尺寸计算，两薄透镜组的焦距和间隔：

前组焦距： $f'_1 = 120 \text{ mm}$ ；

后组焦距： $f'_2 = -48 \text{ mm}$ ；

前后两组间的主面间距： $d = 95 \text{ mm}$ 。

对两薄透镜组，可以组合成消像差系统设计，还可以分别校正像差方法设计。此例中准备采用后一种方案：对前组直接利用前一个例子的结果 $f' = 120 \text{ mm}$ ， $D = 50 \text{ mm}$ ，因此我们只要设计后一组透镜，光学特性为：

$f'_2 = -48 \text{ mm}$ ，

$D_2 = D \frac{f'_1 - d}{f'_1} = 10.4 \text{ mm}$

物距： $l_2 = f'_1 - d = 25 \text{ mm}$ ，

相对孔径为： $\left| \frac{D_2}{f'_2} \right| = \left| \frac{10.4}{-48} \right| = \frac{1}{4.6}$

采用双胶合透镜组。由于物平面位于有限距离的负透镜组难以找到现成只有进行初级像差 PW 方法来求解。

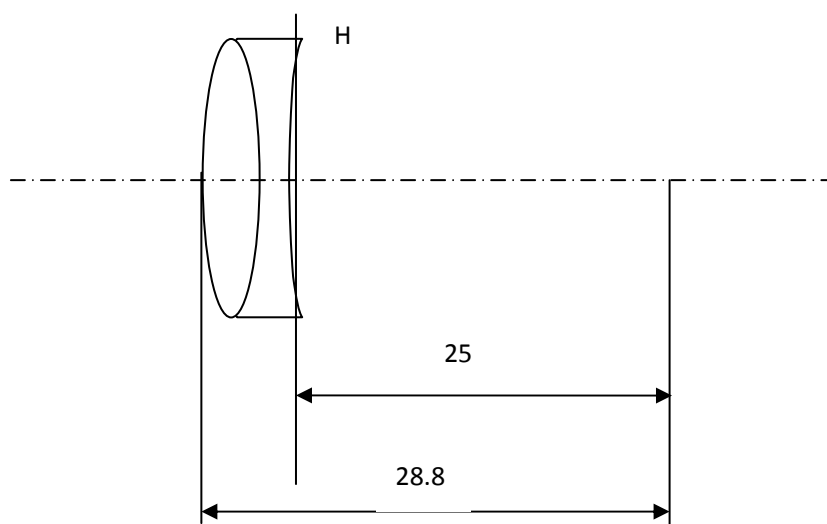
1. 初级像差 PW 方法求解:

前后透镜组均独立校正像差，所以目标要求后透镜组的球差、正弦差、色差都等于零。

求解出的初始结构为:

r	d	玻璃
14.58	2.5	BaF8
-76.18	1	ZK3
8.32		

由于透镜形状为一弯月形的负透镜，其物方主面位于透镜组前顶点的后方，所以从透镜组的前顶点到物平面的距离应该大于 25mm，



因此物距改成: $25+2.5+1=28.8$, 即 $l=28.8$, 由 $2\omega=2^\circ$ 得 $y=f'_l \tan 1^\circ=2.09=2.1$, 总得来看, 系统的光学特性参数为:

$$l=28.8 \text{ mm}, y=2.1 \text{ mm}, l_z=-110 \text{ mm}, \sin U=h/f'_l=25/120=0.2083$$

这时的入瞳距应该等于前组的出瞳距 l'_{zI} 减去前后组的间隔 d , 并不要求很精确。