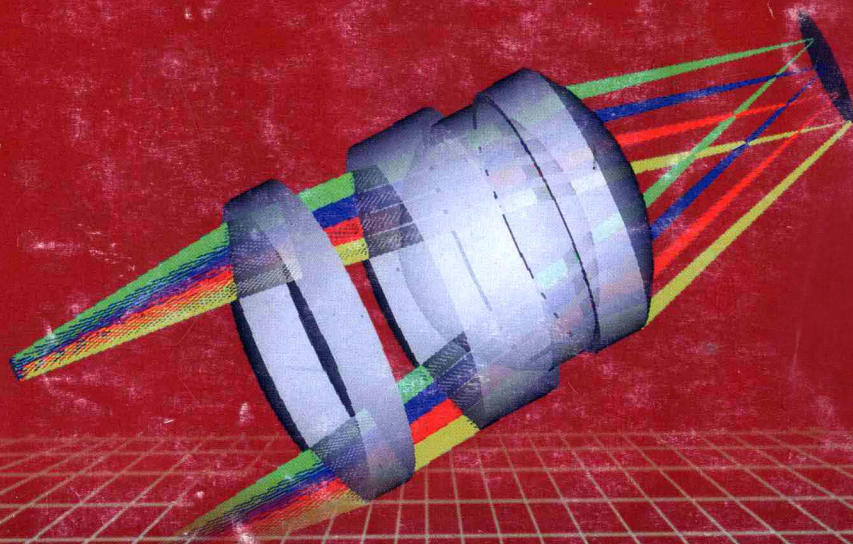


光学设计丛书

# ZEMAX经典实例剖析

2012 (精编版)



光研科学  
WAVELAB SCIENTIFIC



## 序 言

光研科学有限公司始于 2005 年，是美国 Radiant ZEMAX LLC 公司出品的 ZEMAX 光学设计软件在中国大陆及中国台湾地区的独家总代理，负责 ZEMAX 光学设计软件在上述地区的销售推广和技术支持。ZEMAX 光学设计软件是一套综合性光学软件，十分友好的人机使用界面，集成了几何光学以及物理光学的概念、设计、优化、分析等诸多全面的功能，不但可以设计常规的光学系统，还有非序列光学追迹设计（用于照明光学设计、光学系统杂散光分析）、物理光学设计分析（用于激光高斯光束传播与设计、光纤耦合设计与分析）、二维及三维光学设计图形输出、支持扩展宏语言 ZPL 等，几乎涵盖所有光学系统的设计和分析功能。性价比很高，遥遥领先的市场占有率。



公司最初于 2009 年 3 月推出第一本光学设计书籍——《ZEMAX 经典实例剖析》，取得了良好的市场反响和效果。本书内容涵概了整个软件的使用功能，包括系统参数设置、分析功能详解、优化技巧提高、设计方法大全、用户自定义功能及 ZPL 编写以及其它常见问题等等。通过解析大量具体的实例和对常见问题的深刻剖析来展示软件强大的使用功能和雄厚的技术支持力量，适合于 ZEMAX 光学设计初级使用者的深入提高学习，是一本光学研发和设计人员不可多得的读物。

随着 ZEMAX 软件的更新换代和工程师技术经验的不断积累，今年 3 月初，我们又将推出《ZEMAX 经典实例剖析》精编版。根据读者的反馈，书中不仅修正了老版本中出现的一些问题，也增加了软件升级后的新知识点，是从事光学、光电技术、仪器仪表、精密计量及光学检测等方面的研究人员、工程技术人员和在校师生学习参考的最佳良师益友。

“工欲善其事，必先利其器。”为了让广大光学设计人员进一步深入的了解 ZEMAX 光学设计软件的使用技巧，充分发挥 ZEMAX 光学设计软件在实战设计中的作用，我们总结多年来积累的软件使用教学经验、ZEMAX 使用者提出的常见问题、以及使用中会遇到的疑难点、以及最新版 ZEMAX 的新的功能，针对性的详细解答。还精选了一些实战例子，图文并茂，循序渐进。适合于 ZEMAX 光学设计初级使用者的深入提高学习，希望此书能为现代光学设计工程技术人员在实战设计中助其一臂之力。

# 目 录

<b>第一章 系统参数与分析功能详解</b> .....	<b>1</b>
1、如何同时定义多个不同视场类型，如何分别定义不同的视场数值及每个视场中间怎么插入其它视场值？ .....	1
2、视场点怎么设置才能使优化效果最佳？ .....	3
3、定义非旋转对称系统要怎么操作？ .....	4
4、如何分析及优化具有某一波段的激光经透镜聚焦后焦点弥散光斑大小？ .....	7
5、光通过某种材料后能量的损失（由于材料吸收或反射）将如何分析？ .....	11
6、ZEMAX 在序列模式下厚度为负值时的情况，除了反射系统定义负的厚度外，非反射系统的负厚度值有何意义？怎么用于模拟远心物空间？ ZEMAX 有更为快捷的方法来模拟远心物空间吗？ .....	13
7、当 MTF 的值不能被计算时，难道是由于采样过低造成的吗(见下图)？ .....	17
8、如何分析在 NSC 模式下干涉仪的干涉条纹，它与探测器的像素及分析光线的条数有怎样的关系？ .....	19
9、透镜半口径 SEMI-DIAMETER 设置成自动的情况下，为何光线仍然错过(MISS)透镜边缘向后传输？ .....	23
10、几何像分析功能中的 FIELD SIZE 和 IMAGE SIZE 的大小怎么设置，它和系统分辨率有何关系，如何用它来查看多模光纤的耦合效率？ .....	27
11、新版像模拟 (IMAGE SIMULATION) 下五种像分析功能有何区别与联系？ .....	32
12、如何确定透镜的最小有效口径？ .....	33
13、如何进行鬼影分析？怎么查看鬼影分析后的能量损失？ .....	36
14、为何像面与它重合的面两者光学性能有时会不同？ .....	40
15、快速调整工具和滑板工具的使用方法？ .....	44
16、像空间 F/#、近轴工作 F/# 与工作 F/# 有何区别与联系？ .....	47
17、在 ANALYSIS -> CALCULATION -> FIBER COUPLING EFFICIENCY 下的光纤耦合效率计算中，何时使用惠更斯积分，何时不使用？ .....	48
18、为什么光阑处的照明会提及到“切趾分布”？切趾分布有什么作用？ .....	49
<b>第二章 优化技巧提高</b> .....	<b>53</b>
19、玻璃材料的优化，材料的相对折射率 ND 和阿贝数 VD 的控制方法？ .....	53

20、怎么控制非球面厚度？ .....	59
21、如何区分 OPTIMIZATION、GLOBAL SEARCH、HAMMER OPTIMIZATION 三者之间的关系？ .....	64
22、如何在优化的同时考虑制造公差？ .....	65
23、在新版 ZEMAX 中，优化非序列光学系统，怎样理解 DLS 和 OD 两种优化算法？ 为什么在照明设计中 OD 算法更加优越？ .....	71
24、系统畸变怎么控制？ .....	75
25、理解 MTF 的含义，怎样使用 MTF 操作数控制系统的 MTF？ .....	77
<b>第三章 设计实例漫谈 .....</b>	<b>78</b>
26、如何模拟光线经过 1/2、1/4 等波片后光的偏振方向的变化？ .....	78
27、如何模拟柱面镜？ .....	80
28、在序列与非序列 NSC 两种模式下设计多焦点透镜？ .....	83
29、在 NSC 模式下模拟渐变折射率材料如何选择？ .....	90
30、在新版 ZEMAX 中，如何模拟高分辨率的镜头成像？.....	95
31、如何模拟序列全反射棱镜？ .....	107
32、如何在序列模式下模拟光楔（OPTICAL WEDGE）或分光棱镜，三种坐标断点方法的 应用及区别？ .....	111
33、怎样使用找到最佳非球面工具？ .....	119
34、如何进行热分析，怎么进行无热化设计？ .....	122
35、如何使用 IMSF 操作数对中间表面进行优化？ .....	128
36、什么是泽尔尼克系数（ZERNIKE COEFFICIENTS）？ .....	131
37、泽尔尼克多项式（ZERNIKE）和赛德尔像差（SEIDEL ABERRATION）的关系是什么？ .....	133
38、如何使用 ZERNIKE 面型来模拟未知光学元件，即“BLACK-BOX”系统？ .....	135
39、如何模拟复杂菲涅尔透镜（FRESNEL LENS）？ .....	144
40、什么是二元光学面（BINARY SURFACE），它有何独特的功能和特点？ .....	147
41、如何使用二元光学面（BINARY 2）来模拟衍射光学元件？ .....	149
42、如何模拟双通道系统的倾斜和偏心，怎样对双通系统进行公差分析？ .....	156
43、将一个镜头在物空间远心很容易，但是我如何能让它在像空间远心呢？ .....	167
44、怎样颠倒一个光学系统？ .....	169
45、什么是物理光学传播？（PHYSICAL OPTICS PROPAGATION 简称为 POP），如何使用此	

功能进行光纤耦合，吉布斯现象的模拟？ .....	174
<b>第四章 用户自定义功能及 ZPL 宏语言编写.....</b>	<b>189</b>
46、如何创建自己的玻璃库？ .....	189
47、如何定义要用到的玻璃库？ .....	193
48、如何理解及自定义表面膜层文件？ .....	195
49、在 ZEMAX 的 LAYOUTS 中如何画特定的光线？ .....	202
50、如何在非序列模式下创建孔径和离轴反射系统？ .....	206
51、ZPL 实例：如何输出某角度主光线对应的像面高度？ .....	210
52、自定义面 DLL 的生成 .....	213
53、ZPL 中参考一个面或一个物体最好的方法是什么，这样当面/物体被插入或删除抑或是编号被改变时，宏语言是否仍然能正常工作？ .....	217
<b>第五章 其它常见问题汇总 .....</b>	<b>219</b>
54、如何将 ZEMAX 产生的物体模型导入导出为其它软件可打开的格式？ .....	219
55、如何理解 NSC 中环形非球面透镜 (ANNUALAR ASPHERIC LENS) 的 THK APERTURE(厚度孔径)的意义，此参数对环形非球面的厚度优化有何贡献？ .....	221
56、如何理解公差反敏感度分析时的增量设置（如下图）？ .....	223
57、如何将 CODEV 文件转换为 ZEMAX 格式文件？ .....	225
58、如何理解“散射向量的最大值不为 1”？ .....	227
59、如何将干涉仪数据导入进 ZEMAX？ .....	229
60、如何创建高质量的图像和动画演示？ .....	229
61、如何使用曲率中心报告功能来辅助系统装配？ .....	231
62、如何设置透镜固定压边的余量？ .....	234
63、奇次非球面和偶次非球面有何区别？ .....	236
64、如何快速添加反射镜？ .....	237
65、如何快速倾斜/偏心元件？ .....	237
66、什么是 S 和 P 偏振态，应该如何输入 S 偏振光束？ .....	238
67、什么是光线的虚拟传播？ .....	238
68、应该从何处获取用于照明设计的 LED 光学性能数据？ .....	239
69、帮助文件将辐射强度定义为“余弦空间光线的非相干强度（辐射强度）这是被像素界定的立体角分隔的光线强度的总和”。怎么定义这个被像素界定的立体角？ .....	244

70、没有定义涂层的反射镜或物体，它的反射率是如何考虑的？ .....	245
71、什么是.SES 和.CFG 文件？ .....	245
72、怎么快速查看光学系统像差，找到产生像差的最敏感的面？ .....	249
73、NSC 中出现的“没有分配足够的光线段来追迹所有可能的光路”是什么意思？ ....	251
74、如何将 FWHM 转换为 $1/e^2$ 半宽度？ .....	257
75、ZEMAX 技术支持可以在远程桌面上运行吗？就像远程电视会议那样。 .....	259
76、ZEMAX 中是否可以杂散光分析？ .....	260
77、在 NSC 中能定义除了空气以外的背景材料吗？ .....	261
78、默认情况下 ZEMAX 模拟的所有光学面都是圆形孔径，怎么才能让它模拟出一个外形为矩形或者其它的外形？ .....	265
79、当在膜层中进行偏振光线追迹，ZEMAX 使用“光线”和“视场”系数报告反射，透射和相位数据。这两者是什么，它们有什么区别，我们应该使用哪个？ .....	267
80、均方根波前差 vs 视场图 (RMS WAVEFRONT ERROR VS FIELD PLOT) 中多色波前差比所有的单一波长差要大。为什么会这样？ .....	270
81、ZEXPORT.MSG 文件是什么？ .....	271
82、第一次如何安装 ZEMAX12？ .....	272
光研科学有限公司简介 .....	282
产品介绍.....	283

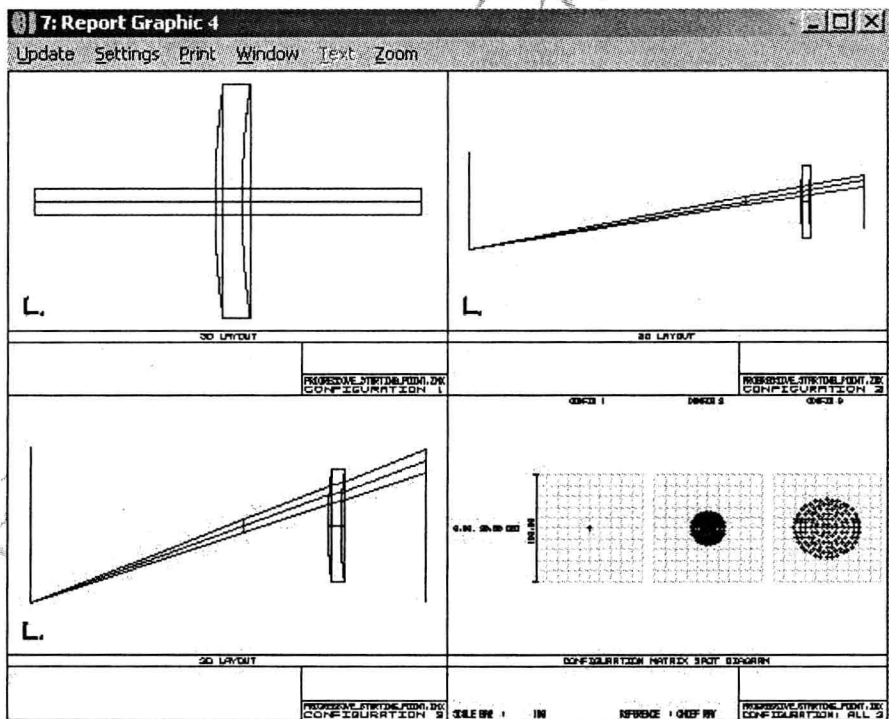
## 第一章 系统参数与分析功能详解

### 1、如何同时定义多个不同视场类型，如何分别定义不同的视场数值及每个视场中间怎么插入其它视场值？

解答：在成像系统中，系统的性能与视场设置关系重大，视场是决定系统的一个重要参数，通常的成像镜头都是在适合一定的视场条件下设计出来的。随着目前对镜头设计要求的提高，视场的设置要求也在逐渐提高。

在 ZEMAX 序列设计中，一般会在视场设置上遇到或多或少的问题，我们针对用户对视场的设置需要，帮助用户解决如何设置多视场的问题。

在一个系统中，只能定义一种视场类型和在此类型下定义 12 个不同的视场数值。但我们若想设计这样一个非球面眼镜片：对无限远和有限距离的物体都能很好的成像（如下图）：



我们知道，对于无限和有限远的物体，我们要求不同的视场类型，无限远时我们通常使用视场角来定义视场，有限远时用物高作为视场。这在一个系统中是无法实现的，故 ZEMAX 需使用多重结构来完成。在多重结构条件下，一



个组态就相当于一个系统，但它们并不是完全独立的，我们可以进行综合优化，使系统能在所有组态下达到我们要求的标准（RMS 最小或 OPD 最小等）。多重组态结构对视场的操作主要通过多重组态操作数来完成，常用的操作数有：

视场类型 FLTP：可设置视场的四种基本类型如视场角，物高，近轴像高；

视场数值 XFIE，YFIE：确定 X 或 Y 视场值的大小；

视场权重 FLWT：可设置不同组态下视场权重，用于优化控制；

视场渐晕 FVAN，FVCX，FVCY，FVDX，FVDY：设置渐晕因子。

对于上述设计，我们只需这样设置多重结构操作数，如下图设置：

Multi-Configuration Editor				
Edit Solves Tools View Help				
Active : 3/3	Config 1	Config 2	Config 3*	
1: MCOM	0	infinite	close	closer
2: FLTP	0	0	1	1
3: THIC	0	1.000000E+010	100.000000	50.000000
4: FLWT	1	1.000000	1.000000	1.000000
5: YFIE	1	0.000000	10.000000	20.000000

完成视场类型设置后，我们可以在评价函数编辑器内对每个视场进行中间插值，例如第二个组态的视场物高为 10，我们通过在评价函数的第二个组态内输入多个 FDMO 操作数，对此视场插入一系列值。FDMO 为新版本中增加的新的视场操作数：

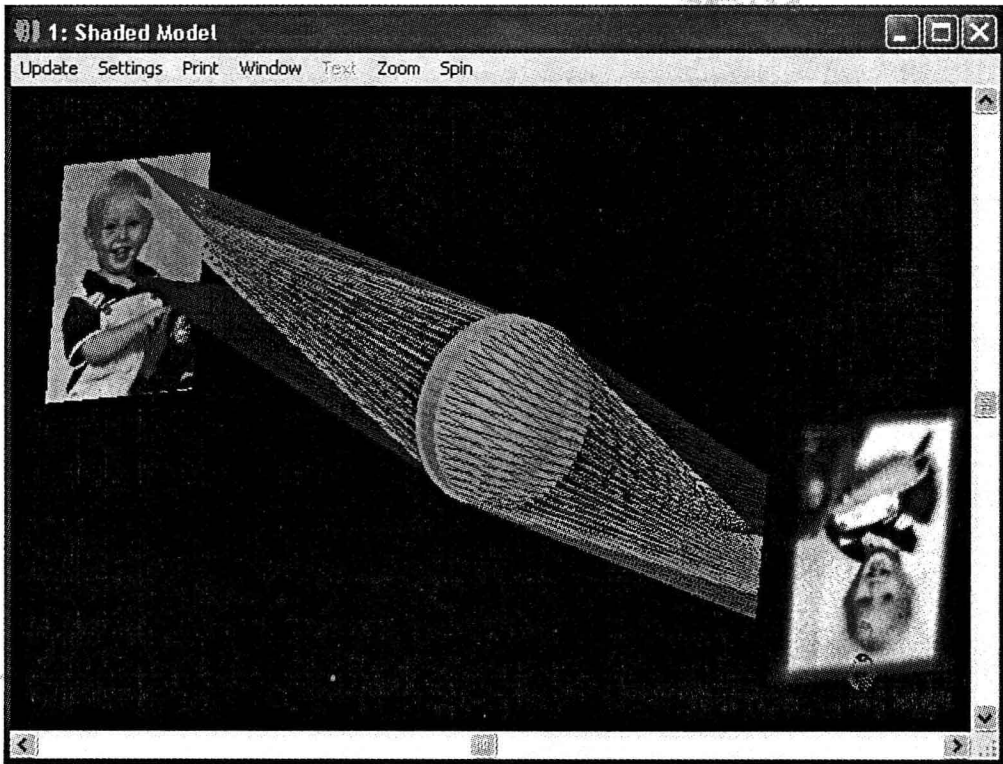
Merit Function Editor: 1.219313E-002								
Edit Tools View Help								
Oper #	Type	Field		Hx	Hy	VDX	VDY	
1	CONF	CONF	2					
2	FDMO	FDMO	1	0.000000	1.000000	0.000000	0.00	
3	FDMO	FDMO	1	0.000000	2.000000	0.000000	0.00	
4	FDMO	FDMO	1	0.000000	3.000000	0.000000	0.00	
5	FDMO	FDMO	1	0.000000	4.000000	0.000000	0.00	
6	FDMO	FDMO	1	0.000000	5.000000	0.000000	0.00	
7	FDMO	FDMO	1	0.000000	6.000000	0.000000	0.00	
8	FDMO	FDMO	1	0.000000	7.000000	0.000000	0.00	
9	FDMO	FDMO	1	0.000000	8.000000	0.000000	0.00	
10	FDMO	FDMO	1	0.000000	9.000000	0.000000	0.00	
11	BLNK	BLNK						
12	DMFS	DMFS						
13	BLNK	BLNK Default merit function: RMS angular radius centroid RA 10 x 10 rays						
14	CONF	CONF	1					
15	BLNK	BLNK No default air thickness boundary constraints						

注意：通常对于小视场角球面对称系统我们只需定义 3—4 个视场点即可，因为在一个系统中占主导的像差一般不会大于 3—5<sup>th</sup>。



## 2、视场点怎么设置才能使优化效果最佳？

解答：在视场数据窗口指定的视场其实就是在二维物面上的离散取样点。默认的评价函数，将会使选定视场的评价标准（光斑尺寸，波前差，MTF 等）的均方根（RMS）最小。正常情况下，定义的视场点包括轴上视场和最大视场点。因为轴上视场和最大视场的性能通常是不一样的，用户还需要了解中间视场点性能。由于用户是在 2D 物面而非 1D 物线上进行取样，那么在取样的物面上指定合适的区域（并非相等的距离）的中间取样点就显得很有意义。如果指定了 3 个视场点，当取样相等的区域时，中间视场点并不在轴向和最大视场的中间位置处。注意下面进行取样的系统是旋转对称的，用户只需要在一个半径“臂”上对视场进行取样。



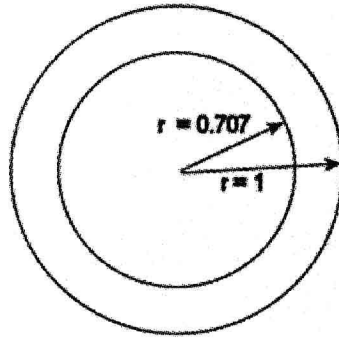
当分成相等面积区域的  $n$  环时，视场值通过以下的简单数列来计算，依次为：

$$0, \frac{\sqrt{1}}{\sqrt{n-1}} \times \text{HFOV}, \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{n-1}} \times \text{HFOV}, \dots, \frac{\sqrt{n-1}}{\sqrt{n-1}} \times \text{HFOV}$$

这里“ $n$ ”表示视场点的个数并且 HFOV（Half Field of View）是最大半视场。

如果  $n = 3$  那么中间视场点是最大视场点的  $1/\sqrt{2}$  倍。

### 3 field points:



$$0, \frac{\sqrt{1}}{\sqrt{3-1}} \times \text{HFOV}, \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3-1}} \times \text{HFOV}$$

$$= 0, 0.707 \times \text{HFOV}, 1 \times \text{HFOV}$$

由于性能不会随视场变化太快，所以对于大多数的系统，中间视场点不需要太多。合理的方法是定义一个或两个中间视场。如果设计者需要添加视场，则应按照上面所述数列来选取，这样优化并评估后的性能会最佳。

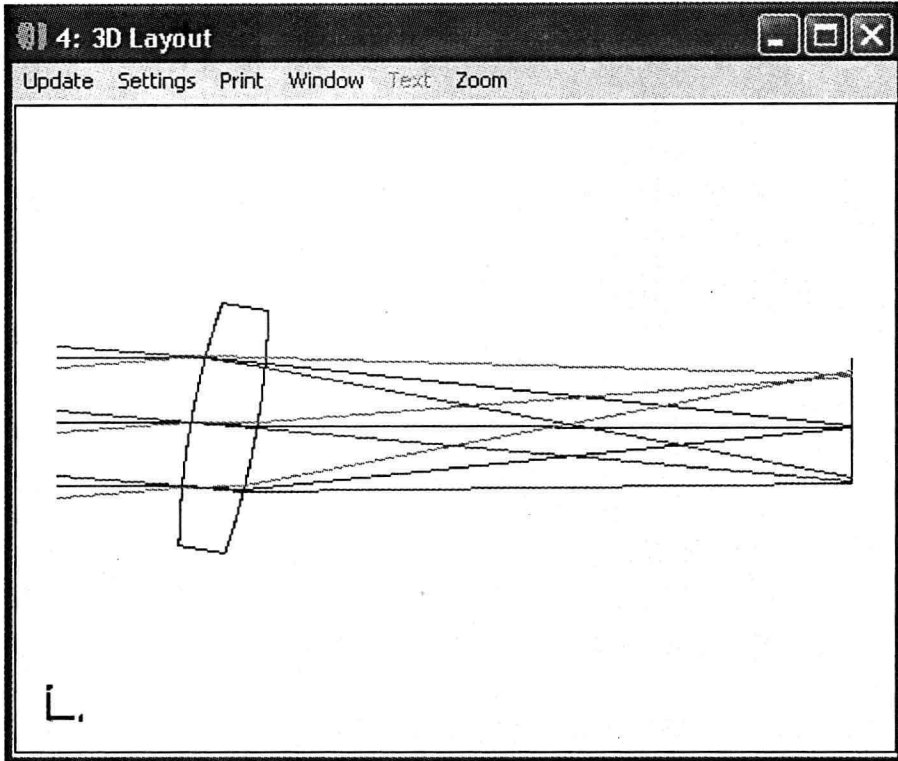
例如定义五个视场点，即  $n=5$ ，由上面公式计算可知：

$$0, 0.5 \times \text{HFOV}, 0.707 \times \text{HFOV}, 0.866 \times \text{HFOV}, 1 \times \text{HFOV}$$

### 3、定义非旋转对称系统要怎么操作？

解答：对于多数非旋转对称系统，正负视场都需要在视场数据对话框窗口进行指定。当进行优化时，用户通常希望得到视场所有标准的均方根的最小值。下面所使用的 X 轴对称的例子中，在视场数据窗口指定正负 Y 视场，就像预期的那样。由于正负 Y 视场包括轴向 0 视场，但是我们仅在视场数据窗口设定轴向视场一次，所以我们要将轴向视场的权重因子设置为 2。换句话说，我们想要得到 +Y 视场 (0, 0) 和 (0, 5) 和 -Y 视场 (0, 0) 和 (0, -5) 标准的均方根的最小值。下面我们将证明，默认评价函数将会考虑指定的视场权重。

载入任意一个单透镜文件并打开视场数据对话框。



注意轴向视场的权重设置为 2:

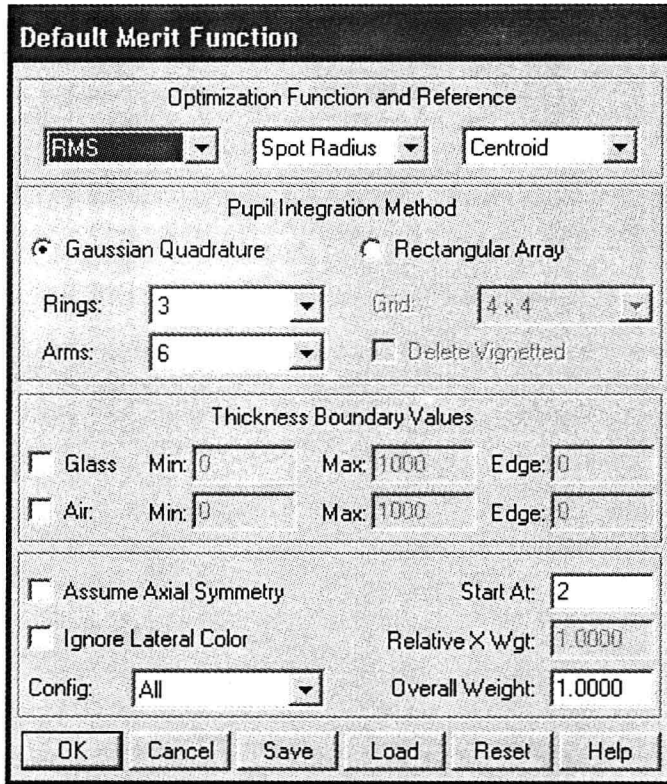
**Field Data**

Type:  Angle (Deg)     Object Height     Parax. Image Height     Real Image Height

Field Normalization: Radial

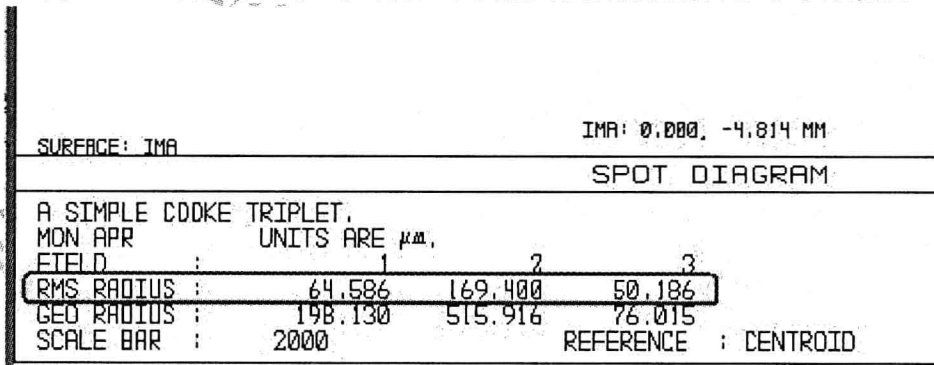
Use	X-Field	Y-Field	Weight	VDX	VDY	V CX	V CY	V AN
<input checked="" type="checkbox"/> 1	0	0	2.0000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
<input checked="" type="checkbox"/> 2	0	5	1.0000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
<input checked="" type="checkbox"/> 3	0	-5	1.0000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000

现在，建立没有边界条件的光斑点列图均方根半径作为评价标准（RMS - spot radius - centroid）默认评价函数：



让我们通过使用点列图（spot diagram）的报告值来计算，以检验评价函数数值是否考虑了视场权重。

用在默认评价函数中的光瞳取样模式是高斯积分取样。点列图设定中取样被设置为 20X20 矩形阵列，以确保对于点列图光瞳取样是均匀有效的。



全部均方根点列图的均方根是：

$$\sqrt{2 \times 64.586^2 + 169.40^2 + 50.187^2} / 2 = 99.445 \text{ um 或 } 0.099445\text{mm}$$

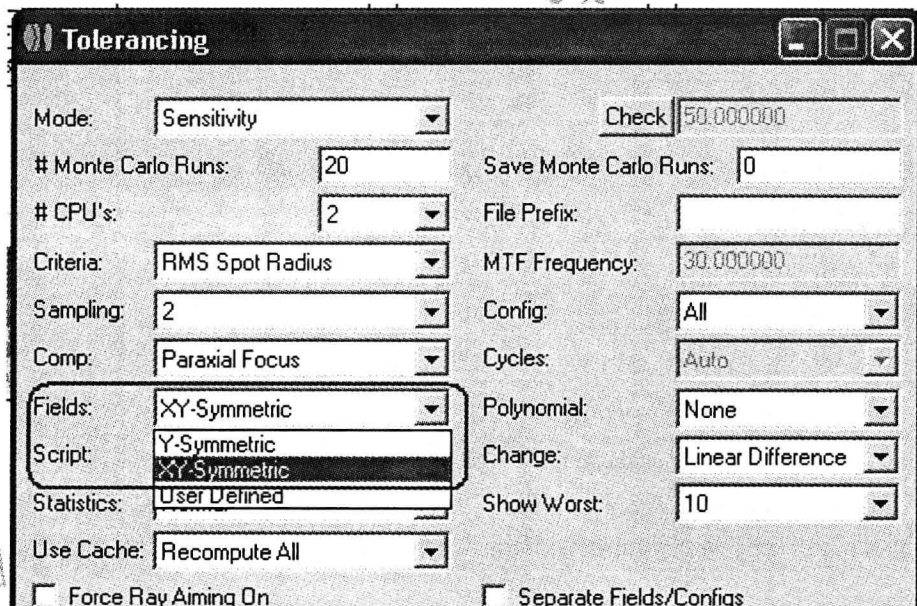
报告的评价函数值是：



Merit Function Editor: 9.944398E-002				
Edit Tools View Help				
Oper #	Type		Wave	Hx
1	DMFS	DMFS		
2	BLNK	BLNK	Default merit function: RMS spot radius cer	
3	BLNK	BLNK	No default air thickness boundary constrair	
4	BLNK	BLNK	No default glass thickness boundary constr	
5	BLNK	BLNK	Operands for field 1.	
6	TRAC	TRAC	1	0.000000

如前所述，依次类推，对于非 X 而且非 Y 对称的系统，轴向视场权重需要被设置为 4，这个我们已经在前面提过了。

当进行公差分析使用其中的一个内建的视场选项的时候，Y-对称（即沿 Y 关于 X 对称，不关于 Y 对称）或 XY-对称（不关于 X 与 Y 对称），ZEMAX 会自动加上 +/- Y 或 +/- XY 视场，为了进行公差分析，给轴向视场加上合适的权重（Y-对称权重为 2，XY-对称权重为 4）。

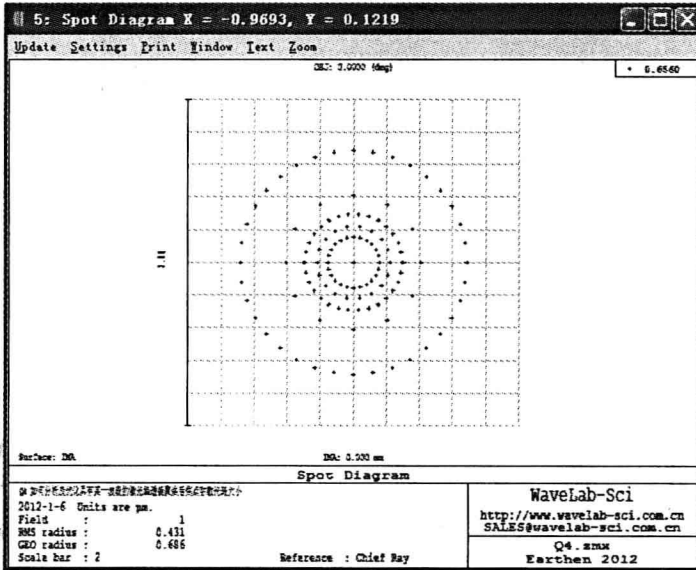
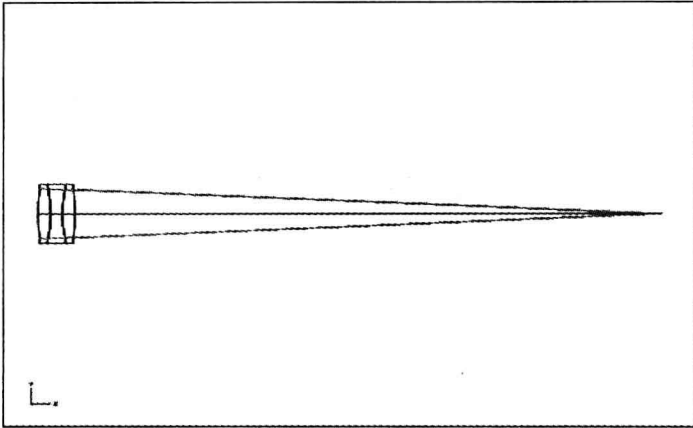


#### 4、如何分析及优化具有某一波段的激光经透镜聚焦后焦点弥散光斑大小？

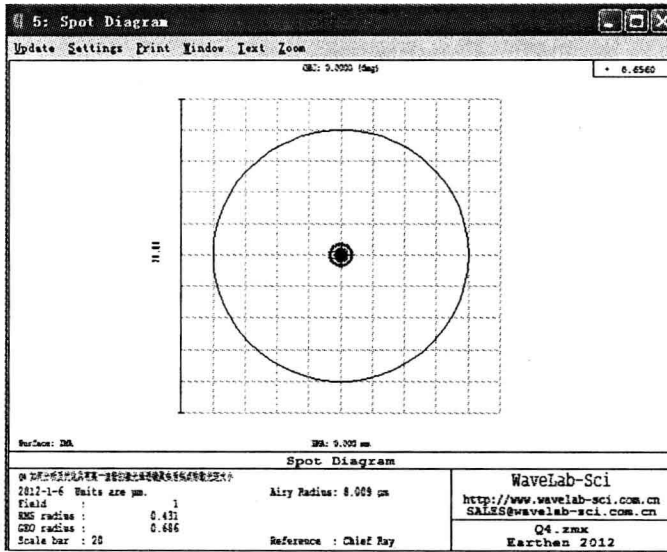
解答：对激光光斑尺寸的分析有两种方案：

第一种采用 PSF 点扩散函数进行分析。因为激光光源考虑的是光的衍射效应，属物理光学传播，而 Spot Diagram 用近似几何光学算法追迹的点列图，它

对处于衍射极限的系统（即实际光斑小于 Airy disk 时）计算是不准确的。此时 PSF 功能即是用衍射理论算法计算出光斑扩散后的实际大小。如下图所示系统：

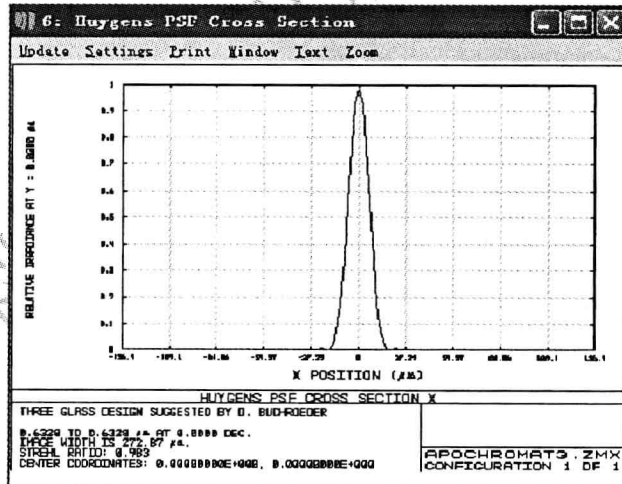


Spot Diagram 图



显示 Airy Disk 后的 Spot Diagram

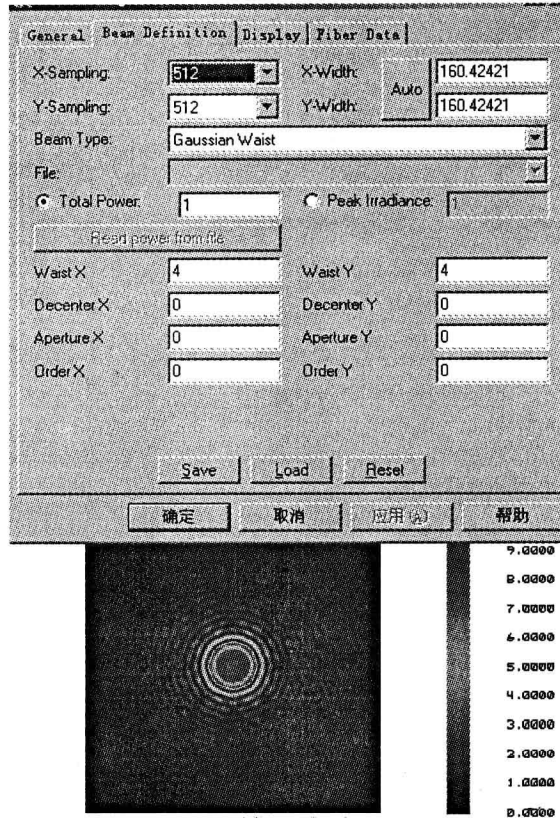
上图可知实际由近似几何光学计算的几何光斑 ( $1.943\mu\text{m}$ ) 远小于 Airy Disk, 此时衍射效应占主导地位, 现在我们打开 PSF 图来观察实际光斑扩散后的能量曲线, 打开: Analysis>PSF>Huygens PSF Cross Section,如图,此时光斑其实在  $15\mu\text{m}$  左右。



Huygens PSF Cross Section 沿 X 方向的扩散曲线

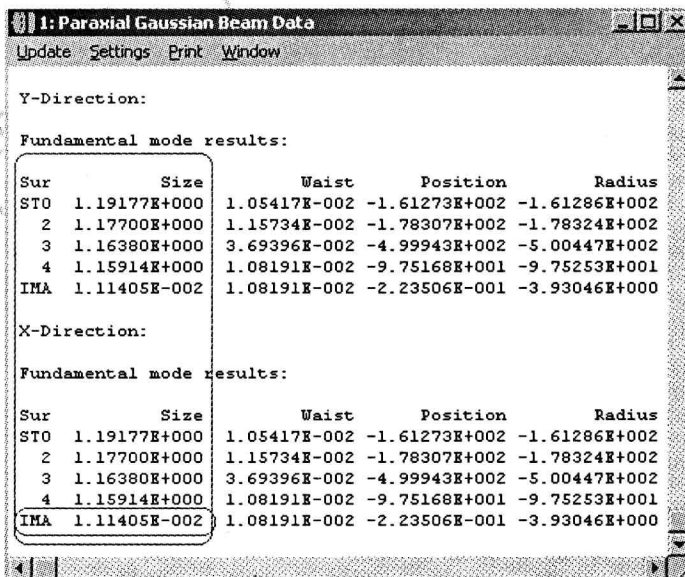
对于优化光斑尺寸, 可以用简单的几何优化方法来让光点最小化 (Spot Radius), 或更近一步使用波前优化 (Wavefront)。

第二种方案观察激光尺寸大小即用物理光学传播功能, 通过设定输出光束的束腰尺寸和形状。通过 Analysis>Physical Optics>Physical Optics Propagation, 看光斑大小:



物理光学传播设定

或可以使用近轴高斯光束查看，如下图：

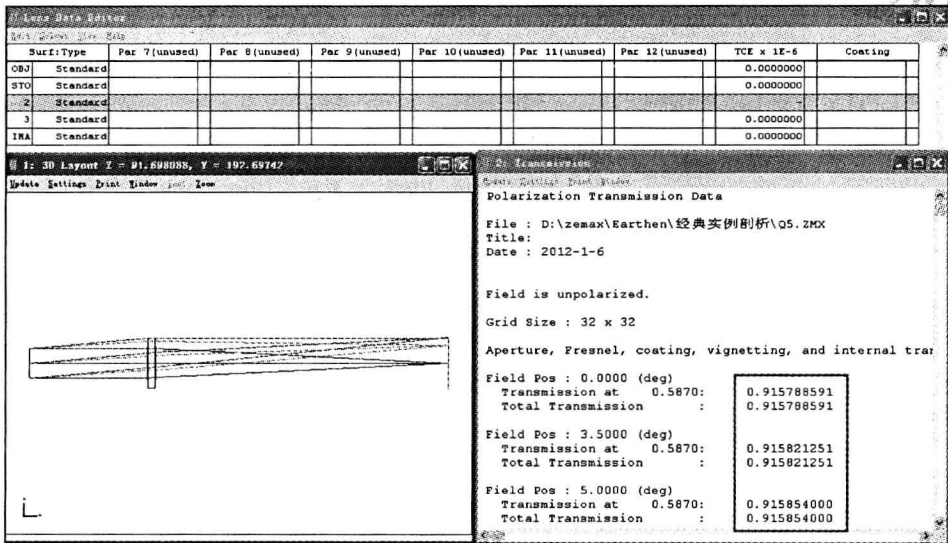




### 5、光通过某种材料后能量的损失（由于材料吸收或反射）将如何分析？

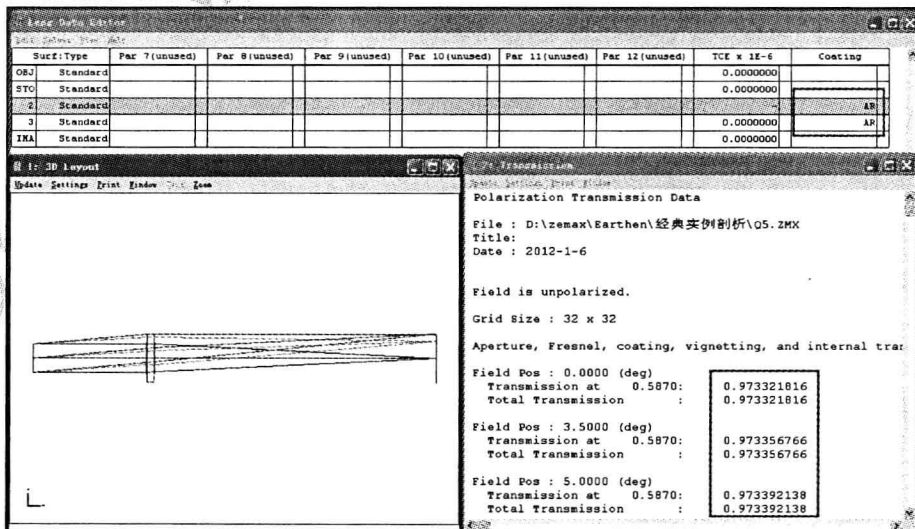
解答：无论任何光源发出的光，经过介质材料以后都会产生能量的衰减。这是由于材料本身的特性，即材料对光的吸收、散射或反射。

在 ZEMAX 序列设计中对镜头的透过率分析中，通常考虑材料的吸收、表面的反射及表面的镀膜情况，默认考虑光的偏振，但不考虑光的散射及分束。如下图所示单透镜透过率（Analysis>Polarization>Transmission）：



未镀膜情况下单透镜的透过率

现增加一层减反膜后：



镀上增透膜后透镜的透过率