



OPTOTEK

ZEMAX光学成像设计实例

ZEMAX EXAMPLES FOR IMAGING OPTICAL SYSTEM DESIGN



南京光科信息技术有限公司

NANJING OPTOTEK TECHNOLOGY CO., LTD.



OPTOTEK

ZEMAX光学成像设计实例

ZEMAX EXAMPLES FOR IMAGING OPTICAL SYSTEM DESIGN

南京光科信息技术有限公司

NANJING OPTOTEK TECHNOLOGY CO., LTD.

目 录

第一章 基础像差理论	- 3 -
ZEMAX 光学设计基础 - 球差 Spherical Aberration.....	- 3 -
ZEMAX 光学设计基础 - 慧差 Coma Aberration	- 12 -
ZEMAX 光学设计基础 - 像散 Astigmatism.....	- 21 -
ZEMAX 光学设计基础 - 场曲 Field Curvature.....	- 29 -
ZEMAX 光学设计基础 - 畸变 Distortion.....	- 39 -
ZEMAX 光学设计基础 - 色差 Color Aberration.....	- 45 -
第二章 基础实例设计	- 53 -
ZEMAX 基础实例 - 单透镜设计.....	- 53 -
ZEMAX 基础实例 - 双胶合消色差透镜设计	- 71 -
ZEMAX 基础实例 - 牛顿望远镜设计.....	- 82 -
ZEMAX 基础实例 - 变焦镜头设计.....	- 99 -
ZEMAX 基础实例 - 扫描系统设计.....	- 111 -
第三章 ZEMAX 基本功能详解.....	- 126 -
ZEMAX 三种优化方法	- 126 -
优化方法选择	- 126 -
Global Search 和 Hammer Optimization 区别.....	- 126 -
局部优化(Optimization)缺点.....	- 130 -
全局搜索优势	- 131 -
DLS 算法.....	- 133 -
OD 算法	- 134 -
ZEMAX 评价函数使用方法	- 134 -
优化中的术语定义	- 134 -
评价函数方程表达	- 135 -
波前优化(Wavefront)方法.....	- 138 -
光斑尺寸优化方法(Spot Radius)	- 141 -
角谱半径优化方法(Angular Radius).....	- 143 -
ZEMAX 多重结构使用方法	- 146 -
实例一: 模拟元件的变化	- 147 -
实例二: 衍射级次显示	- 151 -
实例三: 分光板模拟	- 154 -

ZEMAX 坐标断点使用方法	- 163 -
自带坐标断点使用方法	- 166 -
坐标断点面使用方法	- 167 -
样例一：旋转角度的优化方法	- 168 -
样例二：使用坐标断点精确寻找主光线位置及方向	- 170 -
样例三：坐标返回的使用方法	- 172 -
第四章 目视光学系统设计方法	- 175 -
人眼光学系统的创建	- 175 -
眼睛概述	- 175 -
眼睛模型	- 176 -
使用 ZEMAX 来创建人眼模型结构	- 177 -
放大率与视觉	- 181 -
近距离物体成像标准	- 181 -
小型放大镜放大率	- 181 -
目镜设计实例	- 187 -
设计案例一：惠更斯目镜	- 189 -
设计案例二：冉斯登目镜	- 192 -
设计案例三：凯尔纳目镜	- 195 -
设计案例四：RKE 目镜	- 197 -
设计案例五：消畸变目镜	- 200 -
设计案例六：对称式目镜	- 203 -
设计案例七：埃尔弗目镜	- 205 -
设计案例八：西德莫尔目镜	- 207 -
设计案例九：RKE 广角目镜	- 210 -
目镜调焦	- 212 -
目镜与眼镜的结合分析	- 213 -
显微镜设计	- 223 -
10 倍物镜初始透镜形式	- 224 -
物镜与目镜的连接	- 233 -
望远镜设计	- 241 -
天文望远镜设计	- 241 -
地上望远镜设计	- 246 -
望远镜物镜与目镜的连接	- 252 -

目 录

第一章 基础像差理论	- 3 -
ZEMAX 光学设计基础 - 球差 Spherical Aberration.....	- 3 -
ZEMAX 光学设计基础 - 慧差 Coma Aberration	- 12 -
ZEMAX 光学设计基础 - 像散 Astigmatism.....	- 21 -
ZEMAX 光学设计基础 - 场曲 Field Curvature.....	- 29 -
ZEMAX 光学设计基础 - 畸变 Distortion.....	- 39 -
ZEMAX 光学设计基础 - 色差 Color Aberration.....	- 45 -
第二章 基础实例设计	- 53 -
ZEMAX 基础实例 - 单透镜设计	- 53 -
ZEMAX 基础实例 - 双胶合消色差透镜设计	- 71 -
ZEMAX 基础实例 - 牛顿望远镜设计	- 82 -
ZEMAX 基础实例 - 变焦镜头设计	- 99 -
ZEMAX 基础实例 - 扫描系统设计	- 111 -
第三章 ZEMAX 基本功能详解.....	- 126 -
ZEMAX 三种优化方法	- 126 -
优化方法选择	- 126 -
Global Search 和 Hammer Optimization 区别.....	- 126 -
局部优化(Optimization)缺点.....	- 130 -
全局搜索优势	- 131 -
DLS 算法.....	- 133 -
OD 算法	- 134 -
ZEMAX 评价函数使用方法	- 134 -
优化中的术语定义	- 134 -
评价函数方程表达	- 135 -
波前优化(Wavefront)方法	- 138 -
光斑尺寸优化方法(Spot Radius)	- 141 -
角谱半径优化方法(Angular Radius).....	- 143 -
ZEMAX 多重结构使用方法	- 146 -
实例一：模拟元件的变化	- 147 -
实例二：衍射级次显示	- 151 -
实例三：分光板模拟	- 154 -

ZEMAX 坐标断点使用方法	- 163 -
自带坐标断点使用方法	- 166 -
坐标断点面使用方法	- 167 -
样例一：旋转角度的优化方法	- 168 -
样例二：使用坐标断点精确寻找主光线位置及方向	- 170 -
样例三：坐标返回的使用方法	- 172 -
第四章 目视光学系统设计方法	- 175 -
人眼光学系统的创建	- 175 -
眼睛概述	- 175 -
眼睛模型	- 176 -
使用 ZEMAX 来创建人眼模型结构	- 177 -
放大率与视觉	- 181 -
近距离物体成像标准	- 181 -
小型放大镜放大率	- 181 -
目镜设计实例	- 187 -
设计案例一：惠更斯目镜	- 189 -
设计案例二：冉斯登目镜	- 192 -
设计案例三：凯尔纳目镜	- 195 -
设计案例四：RKE 目镜	- 197 -
设计案例五：消畸变目镜	- 200 -
设计案例六：对称式目镜	- 203 -
设计案例七：埃尔弗目镜	- 205 -
设计案例八：西德莫尔目镜	- 207 -
设计案例九：RKE 广角目镜	- 210 -
目镜调焦	- 212 -
目镜与眼镜的结合分析	- 213 -
显微镜设计	- 223 -
10 倍物镜初始透镜形式	- 224 -
物镜与目镜的连接	- 233 -
望远镜设计	- 241 -
天文望远镜设计	- 241 -
地上望远镜设计	- 246 -
望远镜物镜与目镜的连接	- 252 -

第一章 基础像差理论

ZEMAX 光学设计基础 - 球差 Spherical Aberration

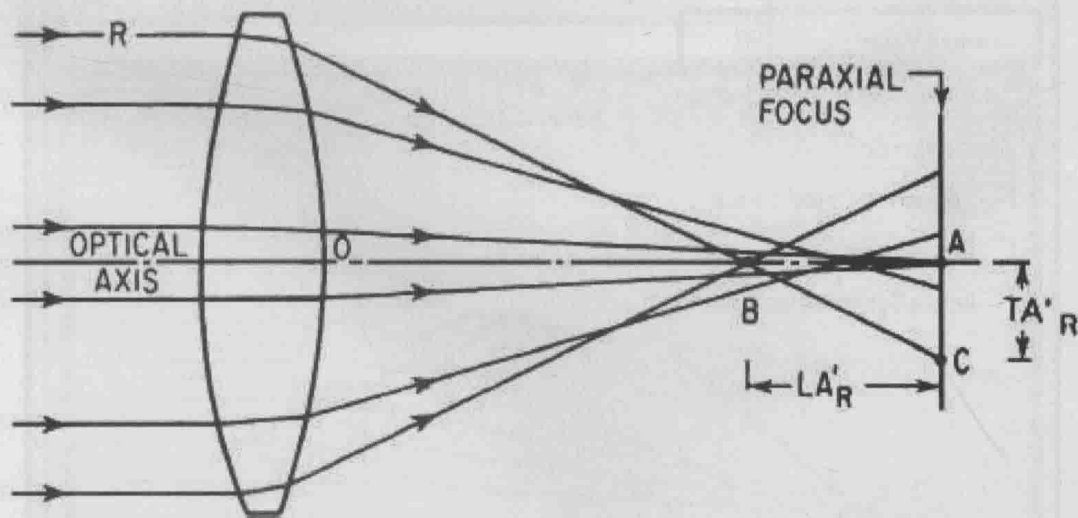
引言

- 在成像光学系统设计中，我们首先需要了解一些最基本的基础知识，即基本的像差理论。
- 懂得像差在光学系统中形成的原因，可以极大地帮助我们校正产生的这些像差，达到很好的成像质量。
- 常见的初级像差:五种单色像差和两种色差。
- 五种单色像差分别为：球差\慧差\像散\场曲和畸变
- 两种色差：球色差和倍率色差

下面我们来详细分析球差产生的原因，以及在 ZEMAX 中的表现形式和消除方法。

球差概念

什么是球差？其实球差也叫球面像差，是指轴上物点发出的光束通过球面透镜时，透镜不同孔径区域的光束最后汇聚在光轴的不同位置，在像面上形成圆形弥散斑，这就是球差。



如果使用定量的方法来计算球差大小，它表示在不同光瞳区域上的光线入射到像面后，在像面上与光轴的垂直高度大小。

球差对成像光学系统设计有着重要影响。由于绝大多数玻璃透镜元件都是球面，所以球差的存在也是必然性。

由于球差的存在，使球面透镜的成像不再具有完美性，球面单透镜的球差是不可消除的。

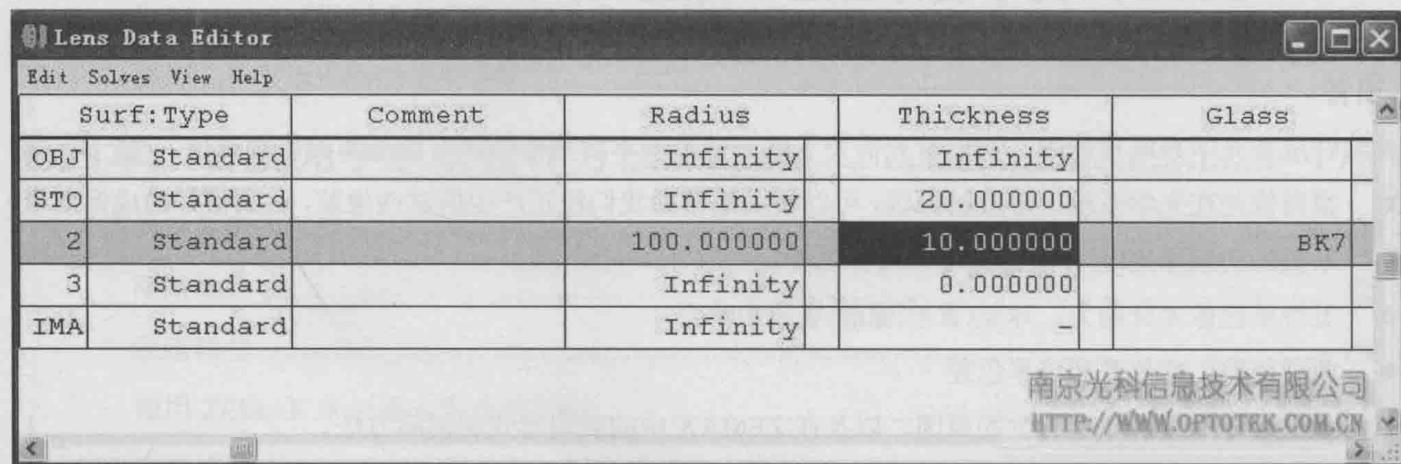
球差特点：在轴上视场产生时为旋转对称像差。

在 ZEMAX 中球差如何表示呢？

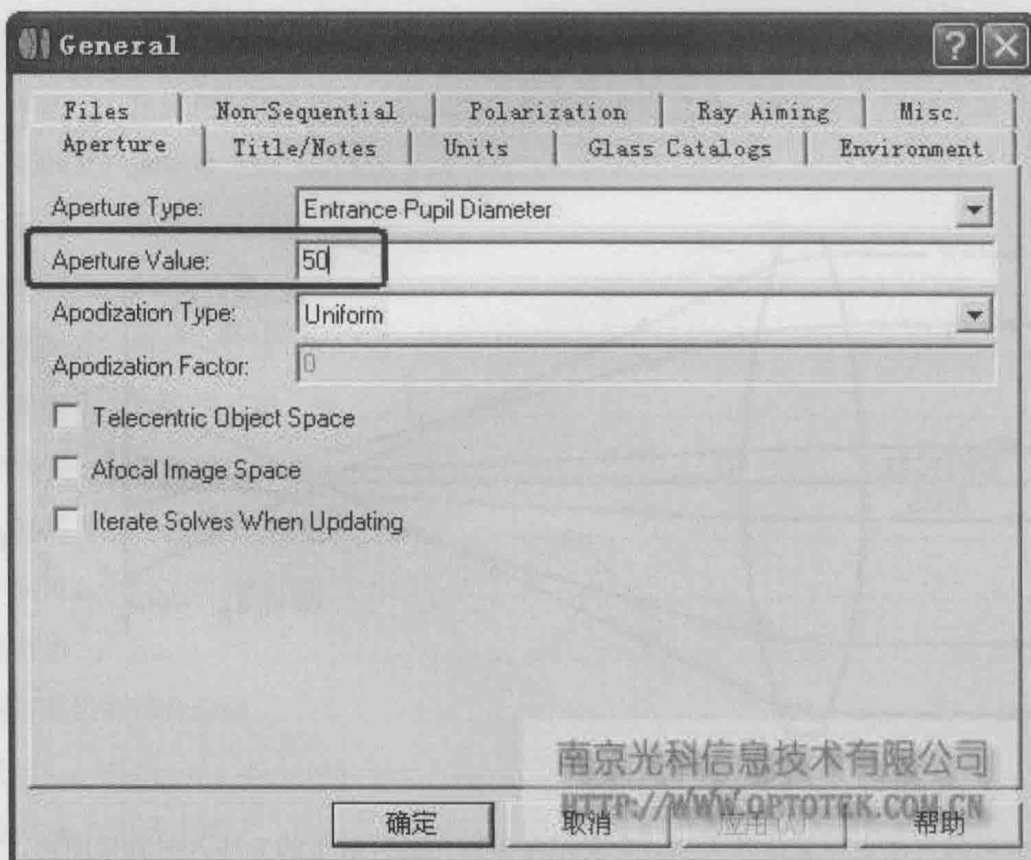
ZEMAX 中球差描述

为了研究球差在 ZEMAX 软件中的详细表示，我们先来设计一个简单的单透镜。

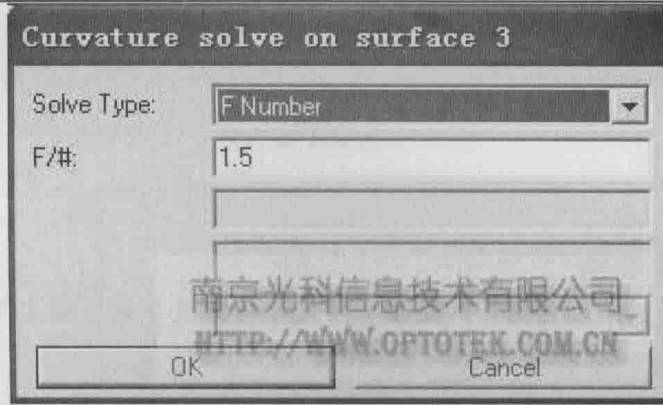
打开 ZEMAX 软件，插入两个标准面，设置透镜厚度 10mm，材料 BK7：



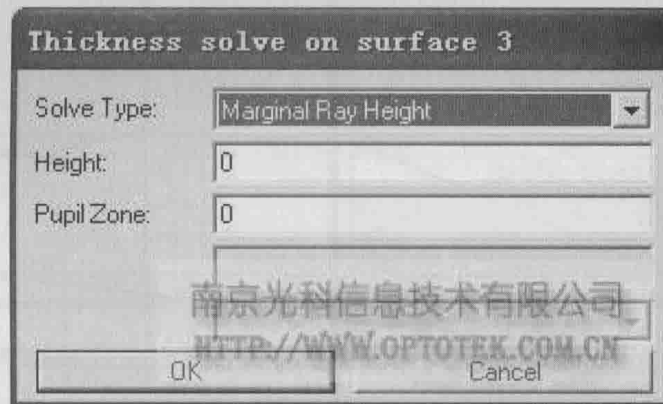
设置系统的入瞳直径大小为 50mm：



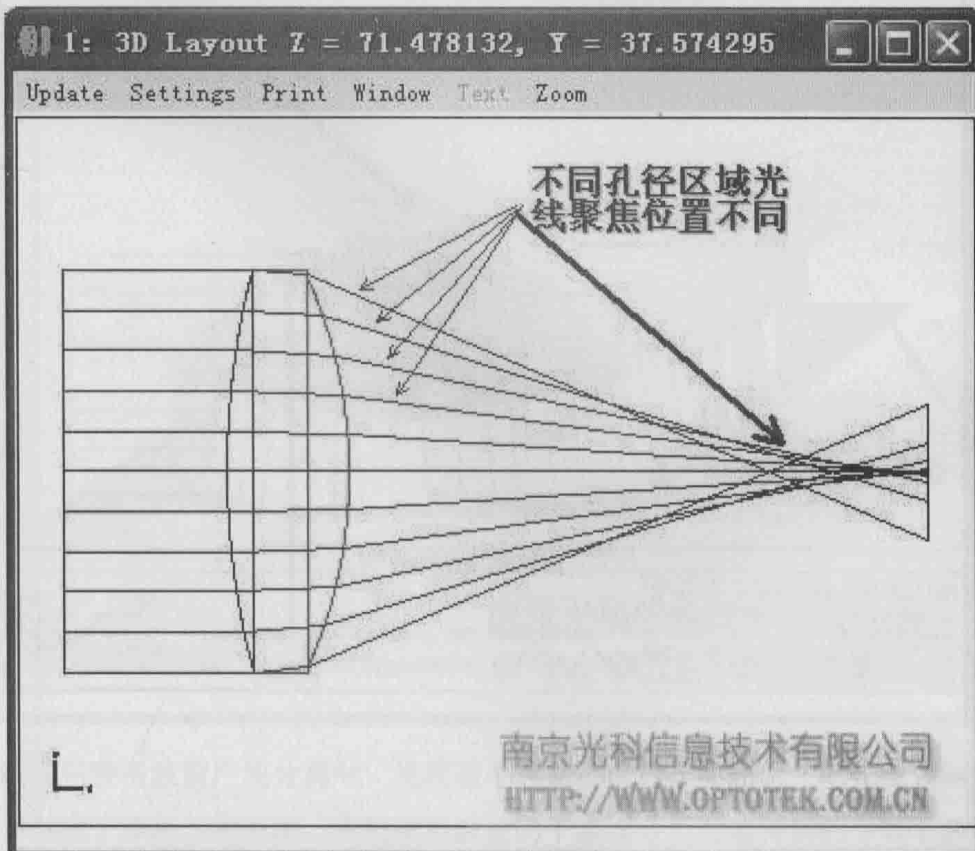
在透镜后表面的曲率半径上设置 F/# 解为 1.5 ($f=D \cdot F/\#$ ，所以焦距为 75mm)：



在像面前的厚度上设置边缘光线高度解，可直接得到焦平面位置：



现在我们就完成了一个简单的单透镜系统：

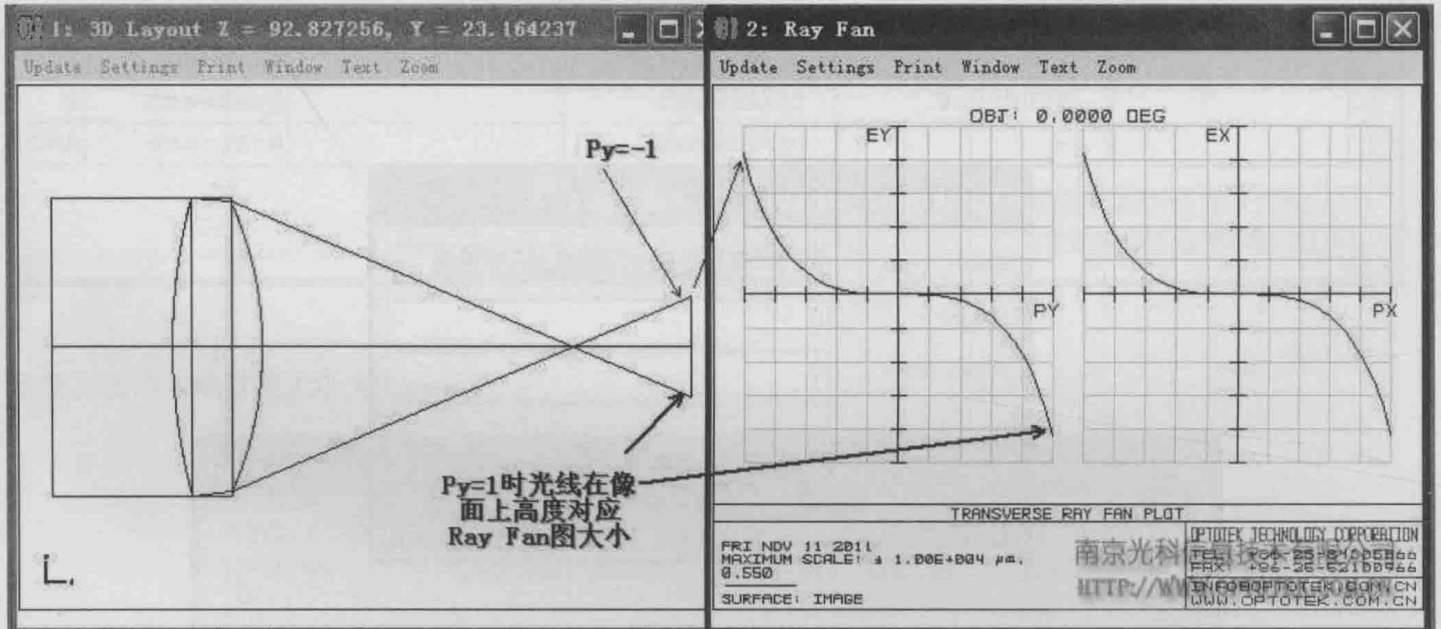


球差在光扇图中的表示

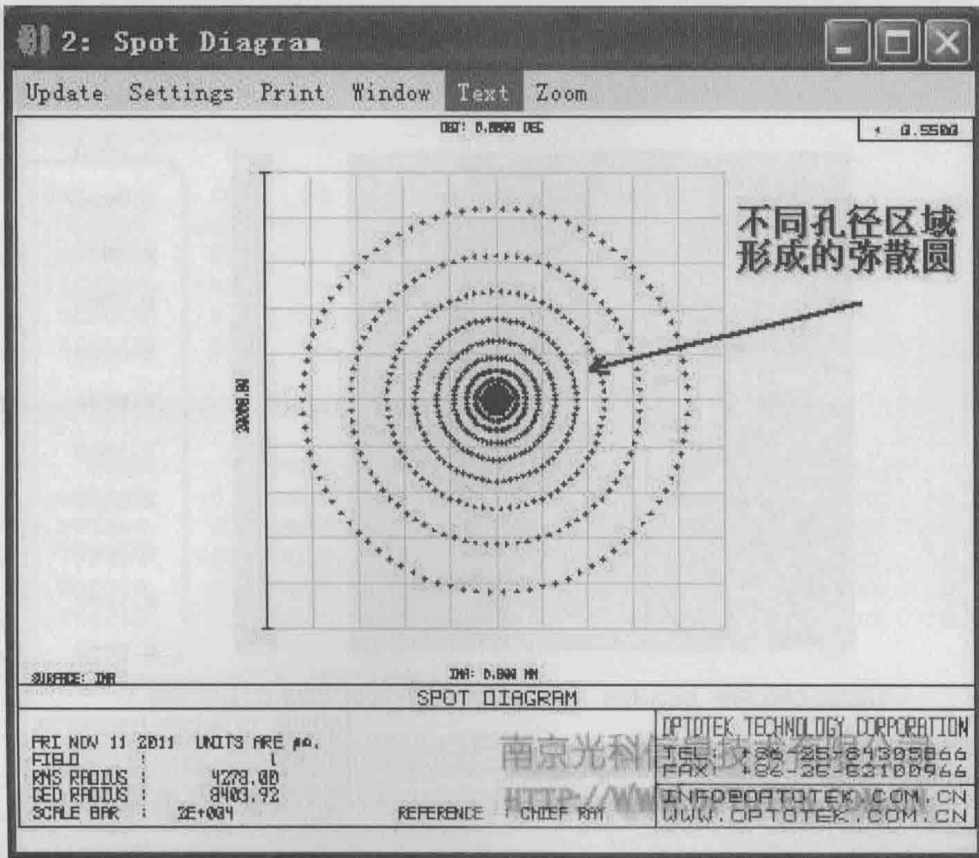
在 ZEMAX 的 Ray Fan 图中可定量分析球差在不同孔径的大小。

Ray Fan 图也叫光扇图或光线差图，它描述的是在不同光瞳位置处光线在像上高度与主光线高度差值。

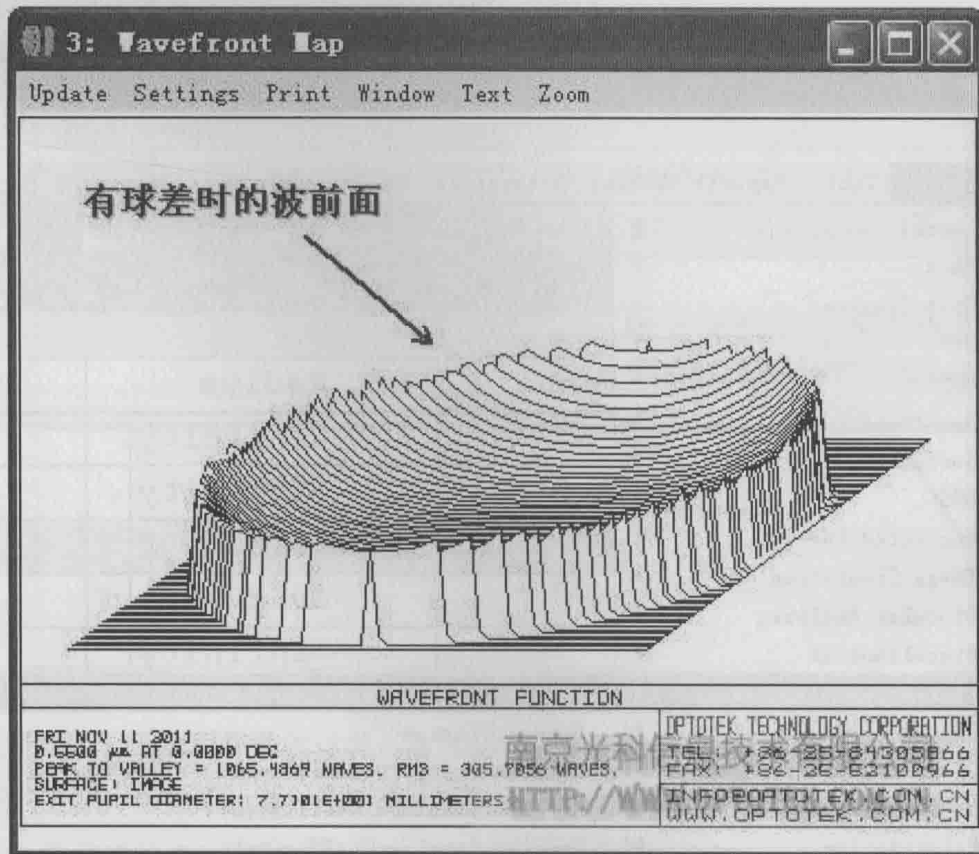
如下图所示为这个单透镜的光线差曲线，也即球差曲线：



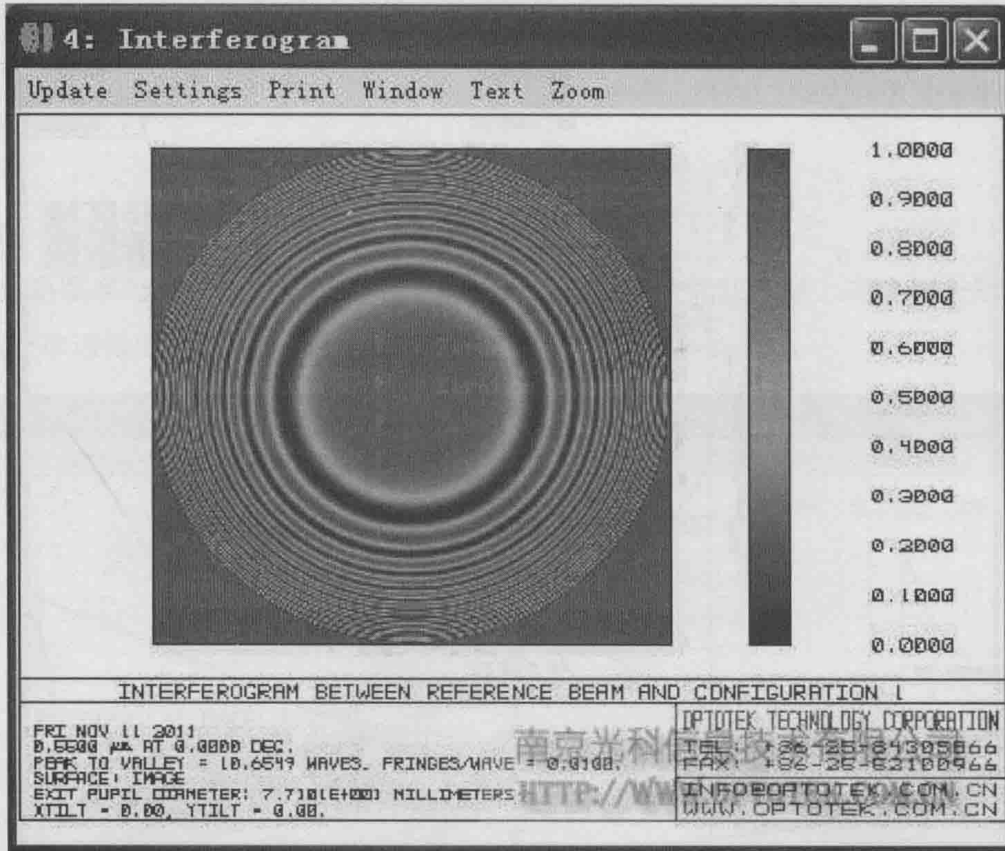
从 Ray Fan 图上可看出球差曲线的旋转对称性。同样，我们也可从 Spot Diagram（光斑图）上看出球差特点：



从光程差上分析，球差的产生其实是波前相位的移动，即在出瞳参考球面与实际球面波前的差异：



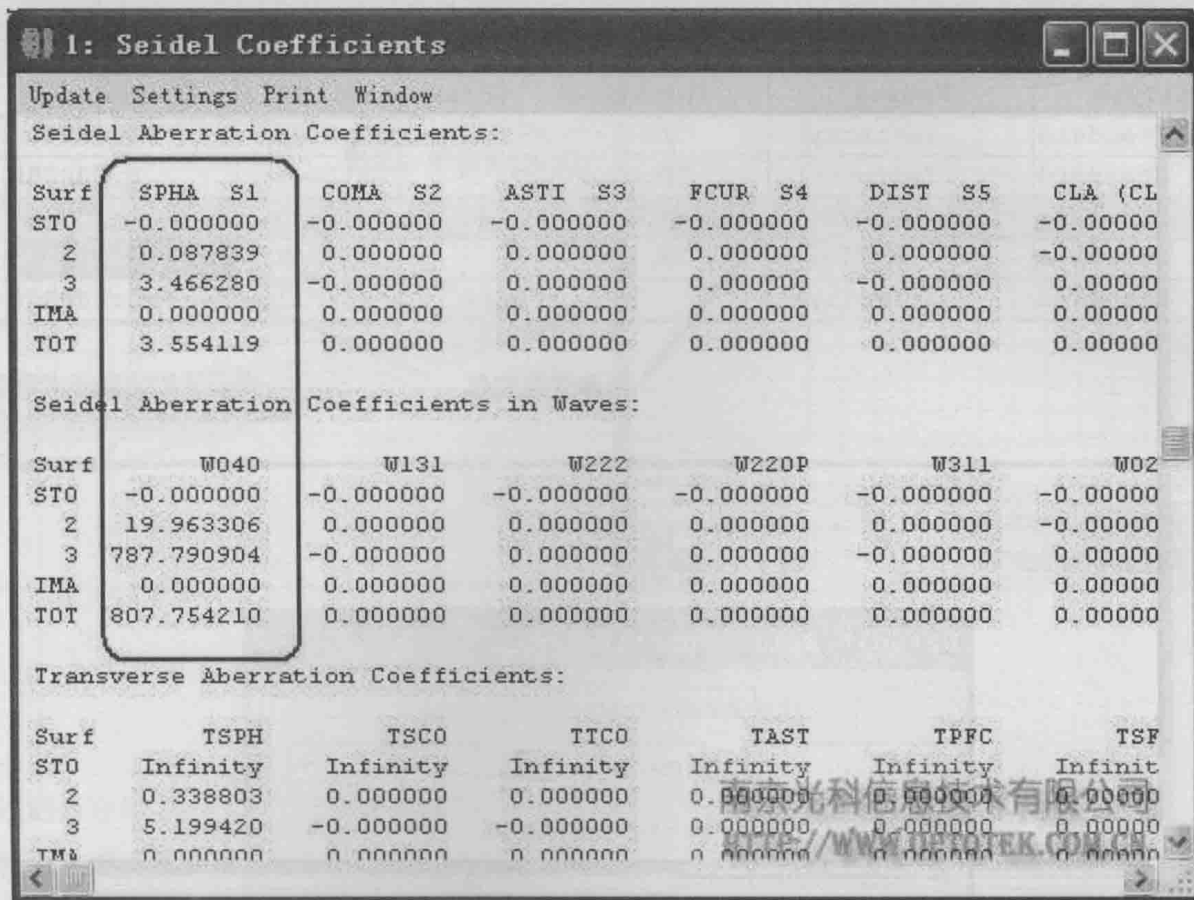
其实当实际波前与参考波前产生分离时，光程差不再相等，这样物面同一束光经实际透镜和理想透镜后，相当于产生了牛顿干涉环，如下图，我们使用波前的干涉图分析功能得到的牛顿干涉环，正如我们分析的那样：



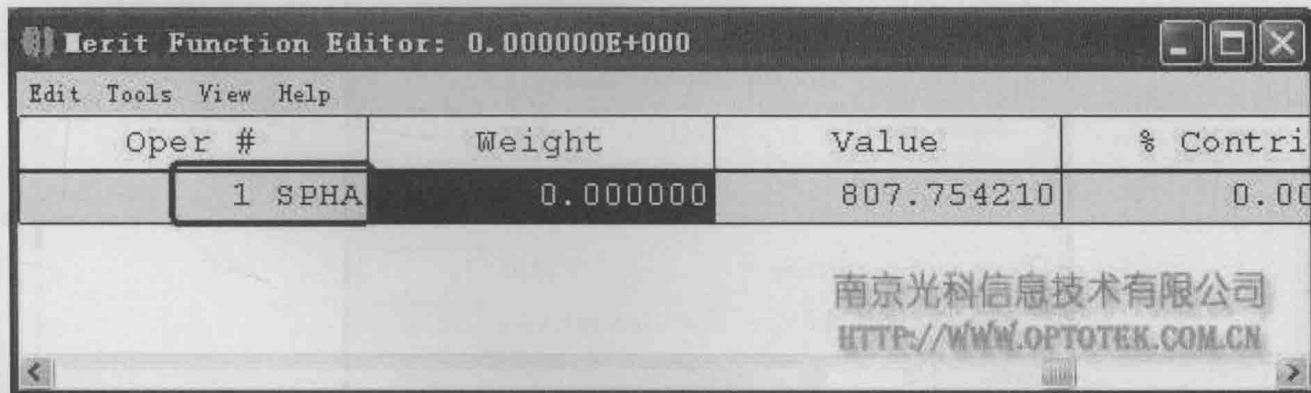
球差的定量分析

这些分析功能都是相互联系的，理论结合实际。我们可以使用 ZEMAX 提供的 Seidel 像差统计查看球差数据：





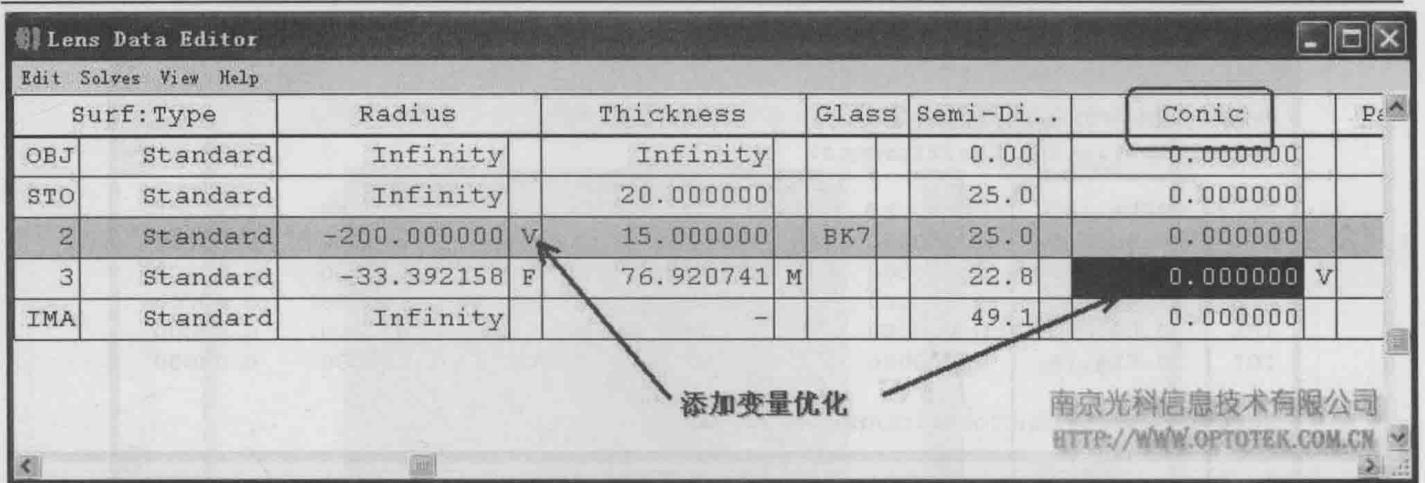
同时我们可以使用评价函数操作数来直接查看球差值：SPHA



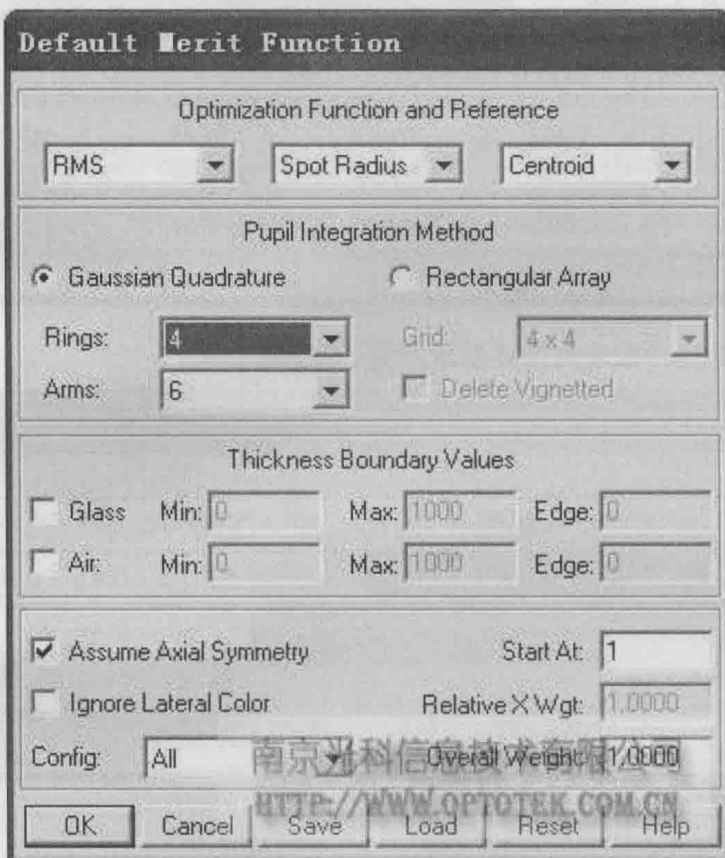
球差的校正方法

球差如何校正呢？

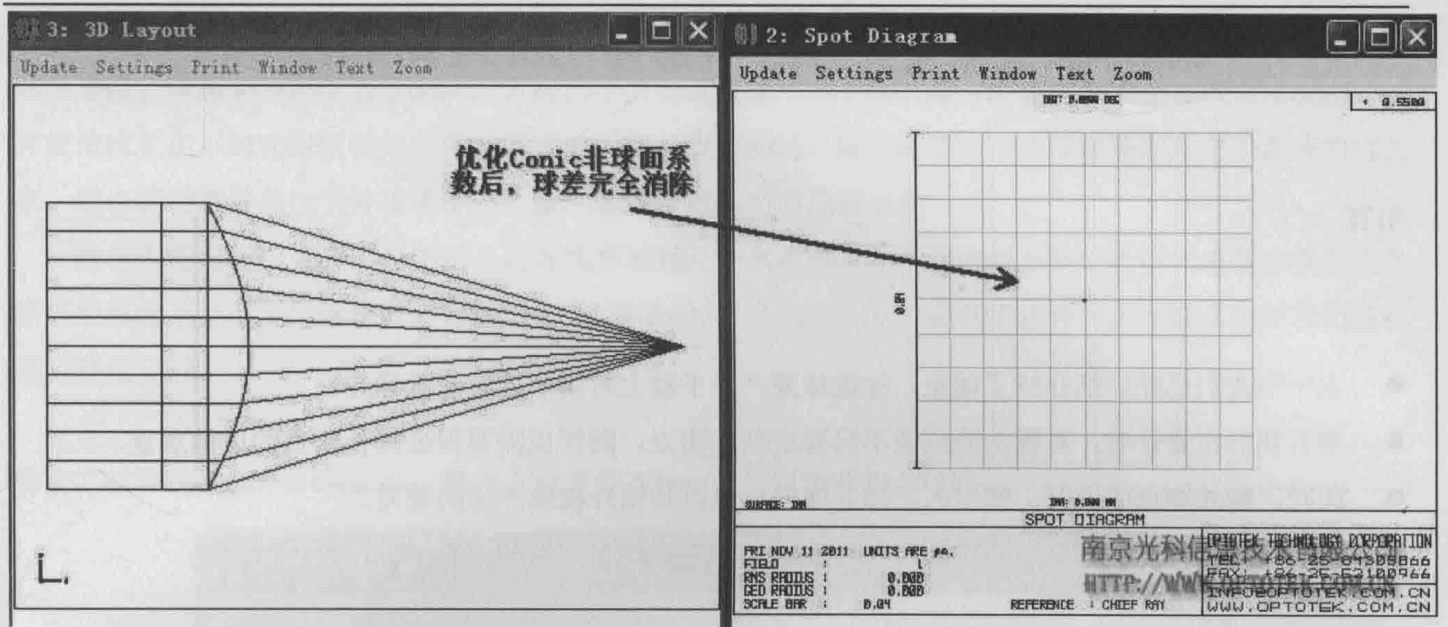
在实际应用中主要使用两种方法：凹凸透镜补偿法和非球面校正球差。我们知道凸面（提供正的光焦度）始终提供正的球差，凹面提供负的球差。这就是为什么双凸单透镜不能消除球差的原因。所以我们可以采用增加透镜的方法，增加凹凸面，从而减小球差大小。另外，在不能增加透镜的情况下，常使用二次曲面来消除球差，即常说的 Conic 非球面。下面我们以此个单透镜为例：



添加优化的目标函数：



优化后，光斑变为零，球差完全消除。可见使用非球面的方法效果显著，但由于非球面加工成本较高，这也成为限制的根本原因。



总结

本节阐述的内容如下：

球差的概念、定义及其重要性。

利用 ZEMAX 的 RAY FAN 查看球差，并指出其特点。

分别展示了 ZEMAX 的 3D LAYOUT、RAY FAN、SPOT DIAGRAM 的球差图形及其联系。

解决球差的常用方法及原理：非球面及像面像差补偿。

在 ZEMAX 如何定量查看球差：像差系数、评价函数。定量分析球差对镜头的加工工艺并，并给出指导。

ZEMAX 光学设计基础 - 慧差 Coma Aberration

引言

- 上一节我们已经详细介绍了球差，知道球差产生于轴上时属于旋转对称像差。
- 那么我们在设计时，对镜头的成像不只要求轴上物点，同样也需要保证轴外物点的成像质量。
- 此时，轴外物点成像时，便引入了轴外像差，也就是轴外视场产生的慧差。
- 本节我们将详细分析慧差的概念，在 ZEMAX 中的表现形式及解决办法。

慧差概念

首先我们要理解什么是慧差？

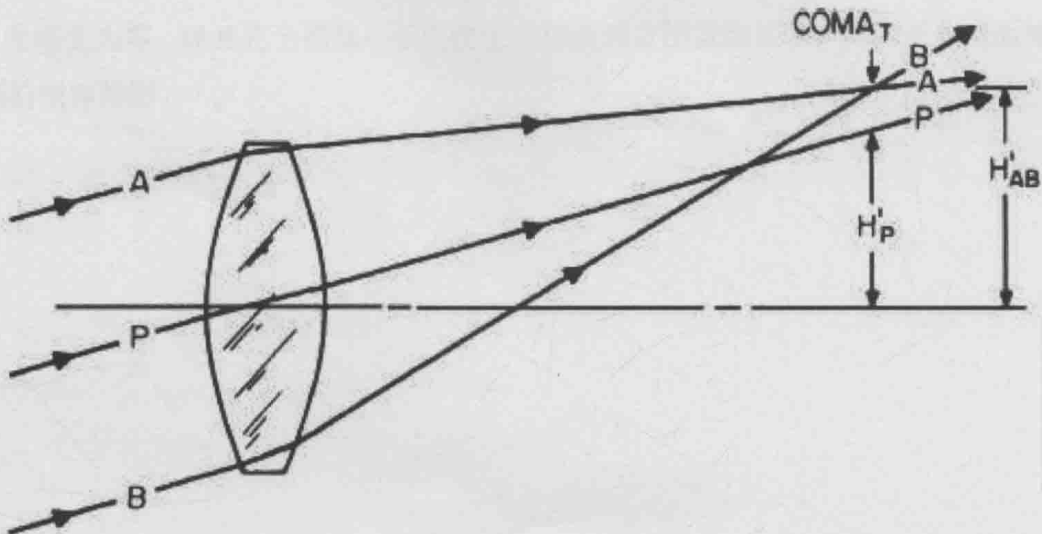
慧差，即轴外物点（或称轴外视场点）所发出的锥形光束通过光学系统成像后，在理想像面不能成完美的像点，而是形成拖着尾巴的如慧星形状的光斑，故对此光学系统的这种像差称其为慧差。

使用几何光学的方法描述慧差，它表示外视场不同孔径区域的光束聚焦在像面上高度不同，换言之，就是外视场不同孔径区域成像的放大率不同形成的。使用几何光斑描述，即主光线光斑偏离整个视场光斑的中心。

通常由于慧差的存在，外视场聚焦光斑变大，使图像外边缘像素拉伸变得模糊不清。慧差只存在于轴外视场，它是非旋转对称的像差。在不同光瞳区域的光线对入射在像面的高度各不相同。

慧差描述

我们用轴外物点发出的锥形光束在像面的聚焦情况来形像描述慧差产生的原因：



如上图所示，我们把外视场整个锥形光束分为四个光瞳区域，靠近主光线的光束区域（即光瞳中心区域）成像在像面上的高度为 Zone1，边缘光线的光束区域（即光瞳边缘）成像在像面上高度为 Zone4，这样就造成了在不同光瞳区域处成像的高度的区别。我们知道，物点在像面上的成像高度决定了系统的放大率。这也说明慧差是由于外视场不同光瞳区域成像放大率不同造成的。

接下来我们使用 ZEMAX 中的几何光线来描述，先来创建一个理想光学系统，所谓的理想光学系统是指这个系统不会产生任何像差，它的成像是“完美的”。ZEMAX 专门提供了这样一种理想系统供我们进行基础理论分析。

首先，打开 System >> General，输入入瞳直径 50mm，将视场改为 10 度：

