

射线光学模块



射线光学模块简介

© 1998-2018 COMSOL 版权所有

受列于 cn.comsol.com/patents 的美国专利 7,519,518、7,596,474、7,623,991、8,457,932、8,954,302、9,098,106、9,146,652、9,323,503、9,372,673 和 9,454,625 保护。专利申请中。

本文档和本文所述的程序根据《COMSOL软件许可协议》 (cn.comsol.com/comsol-license-agreement) 提供,且仅能按照许可协议的条款进行使用或复制。

COMSOL、COMSOL 徽标、COMSOL Multiphysics、COMSOL Desktop、COMSOL Server 和 LiveLink 为 COMSOL AB 的注册商标或商标。所有其他商标均为其各自所有者的财产, COMSOL AB 及其子公司和 产品不与上述商标所有者相关联,亦不由其担保、赞助或支持。相关商标所有者的列表请参见 cn.comsol.com/trademarks。

版本: COMSOL 5.5

联系信息

请访问"联系我们"页面 cn.comsol.com/contact,以提交一般查询、联系技术支持或搜 索我们的联系地址和电话号码。您也可以访问全球销售办事处页面 cn.comsol.com/ contact/offices,获取更多地址和联系信息。

如需联系技术支持,请访问 COMSOL Access 页面 cn.comsol.com/support/case,创建并 提交在线请求表单。其他常用链接包括:

- 技术支持中心: cn.comsol.com/support
- 产品下载: cn.comsol.com/product-download
- 产品更新: cn.comsol.com/support/updates
- COMSOL 博客: cn.comsol.com/blogs
- 用户论坛: cn.comsol.com/community
- 活动: cn.comsol.com/events
- COMSOL 视频中心: cn.comsol.com/video
- 技术支持知识库: cn.comsol.com/support/knowledgebase

文档编号: CM024202

| 简介5 |
|--------------------|
| 关于本书6 |
| 几何光学7 |
| 射线加热 |
| 射线追踪基本原理8 |
| 射线传播 |
| 反射、折射和吸收9 |
| 复色光11 |
| 强度和偏振13 |
| 反射线和折射线强度13 |
| 边界上的介质涂层14 |
| 偏振可视化14 |
| 控制偏振的其他边界条件15 |
| 建模工具16 |
| 光学材料数据库16 |
| 射线-热耦合18 |
| 射线源19 |
| 光学像差分析21 |
| 教学案例:通过双高斯透镜追踪射线22 |

"射线光学模块"是一个功能强大的计算工具,采用射线追踪方法模拟光和其他电磁辐射的传播。射线可以通过模型几何传播,同时在边界上发生反射、折射或者被吸收。

您可以控制射线释放的位置和方向,还可以为几何结构中的每个曲面指派不同 的边界条件。



简单的牛顿望远镜。入射光线通过抛物面主镜聚焦,然后被平面副镜重定向到焦平面。

射线光学的基本假设是辐射波长远小于模型中最小的几何细节,因此可以忽略 衍射。

"射线光学模块"采用非序列光线追迹方法,对边界使用确定性射线分裂算法。也就是说,射线可以同它们所接触的模型几何中的任意表面发生相互作用,而无需*提前*指定射线-边界相互作用的顺序。在不同介质的边界处,每条入射线都会分成反射线和折射线。

在仿真域中,介质可以是均质的,也可以具有梯度折射率。此外,"射线光学 模块"还与计算温度和结构变形的物理场接口完全兼容,支持高保真结构热光 学性能 (STOP)分析。折射率可以取决于波长和温度。

该模块提供各种专用的后处理工具,用于将射线传播进行可视化,提取品质因数以及导出相关数据。

关于本书

本文接下来的章节列出"射线光学模块"提供的物理场接口和多物理场耦合功能。

后续章节描述用于射线光学仿真的各种物理场接口设置和特征。

本书最后一节提供双高斯透镜系统的教学案例,通过分步操作说明详细描述了模型的建立、射线追踪以及后处理。

基于空间维度和预设研究类型的物理场接口指南

| 物理场接口 | 图标 | 标记 | 空间维度 | 可用的研究类型 |
|--------|----|-----|---------------------|----------------------|
| ● 光学 | | | | |
| ₩ 射线光学 | | | | |
| 几何光学 | | gop | 三维、二 维、二维轴 对称 | 射线追踪;双向耦合射线 追踪;瞬态 |
| 射线加热 | ¢ | | 三维、二 维、二维轴 对称 | 射线追踪;双向耦合射线 追踪;瞬态 |

"几何光学"接口 心 位于 "模型向导" 的 "射线光学" 心 分支下,用于 模拟电磁射线的传播。默认情况下,仅求解射线路径,但也可以求解附加变 量,从而分析射线强度、偏振、相位以及光程长度等。射线可以在均质介质和 梯度折射率介质中传播。此接口支持各种射线源,释放的射线可以在模型的任 意边界上发生反射、折射或者被吸收。

射线加热

"射线加热"接口 分 位于"模型向导" ◎ 的"射线光学" 份 分支下,该接口将"几何光学" ≽ 接口与"固体传热" 该按正式行组合。这两个接口通过"射线热源"多物理场节点 % 耦合在一起。

当射线通过折射率为复值的吸收介质时,射线强度会减弱,并可在域中确定一 个沉积热源。随后,这一热源可以和其他热源及边界条件进行组合,用于计算 域温度。

您可以建立双向耦合模型,其中,由射线衰减引起的温度扰动会显著改变介质 的折射率,或引起边界发生热变形。然后,可以通过这一扰动系统追踪射线, 得到一个自洽解。

射线追踪基本原理

射线光学方法最基本的假设是几何结构在光学上非常大,这意味着,即使是模型几何中最小的细节,也远远大于辐射波长。这一假设很有必要,因为"几何 光学"接口不包含衍射效应,这是一种当电磁波与周围几何的边或点发生相互 作用时,在波长尺度上产生的效应。



在障碍物和狭缝与波长大小相当的情况下,障碍物周围(左一)或狭缝中(左二)波的传播产生衍射图样。大障碍物(右二)或宽狭缝(右一)周围的射线传播产生清晰的光和阴影区域。

射线传播

射线传播受介质折射率的控制。这会影响射线在域中的传播速度,

光速 = $\frac{真空中的光速}{折射率} = \frac{299,792,458 \text{ m/s}}{n}$

如果每个域中的介质都是均匀的,或在空间上均匀分布,则射线在每种介质中 都沿直线传播。射线只有在边界上发生反射或折射时才能改变方向。



射线通过具有均匀(非渐变)折射率的透镜传播。

在某些情况下,折射率会在一个域内发生连续变化。由于此时的折射率梯度不 为零,因此这种材料称为梯度折射率介质。在这种介质中,射线可以沿曲线路 径传播。

梯度折射率介质常常出现在耦合仿真中,例如,折射率与温度相关的非等温 域。如果化学扩散模型中的折射率随稀物质浓度发生变化,则其中也可能存在 梯度折射率介质。



射线沿曲线路径通过伦伯透镜的梯度折射率介质。射线上的颜色表示光程长度(左)。 背景灰度表示折射率。

反射、折射和吸收

射线可以按任何顺序与模型中任意数量的边界发生相互作用。由于系统不是按顺序检测射线与边界的交点,因此无需指定边界相互作用的顺序。我们可以根据射线的当前位置和方向,检测射线与某个表面相交的下一个交点,然后将射线外推到该表面,并可在其中应用边界条件。在梯度折射率介质中,由于射线路径可能呈非线性,因此需要采用较小的离散时间步长(或与光程长度相当),才能准确预测交点。



角隅反射镜对射线的镜面反射。

折射

当射线到达折射率不同的两个介质的边界时,使用确定性射线分裂算法可以生成折射线和镜面反射线。折射线的方向通过斯涅尔定律进行计算,

 $n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$

其中 n 表示折射率, θ 表示相对于面法向的角度, 下标 1 和 2 分别表示入射线 和折射线的一侧。射线分裂算法还能自动检测射线何时发生全内反射, 并相应 地抑制折射线的释放。



入射线 (蓝色) 在边界处发生折射, 并同时释放另一条反射线 (红色)。

在材料不连续处很容易抑制反射线的释放。在杂散光并不重要的情况下,这使 您能够专注于研究透镜系统中的折射线。



一对凸透镜中的射线追踪。射线颜色与光程长度成正比,透镜颜色与网格单元大小成正 比。透镜表面反射线的释放受到抑制。

反射和吸收

"几何光学" > 接口的默认特性是将每个表面都视为两个电介质之间的反射和 折射边界。您也可以应用其他边界条件,在表面产生镜面反射或漫反射光线。 在这种情况下,"漫反射"是指朗伯反射,其中,反射角在面法向的分布遵循 余弦定律。

此外,您还可以根据概率或逻辑表达式组合使用不同的边界条件。例如,可以 镜面反射 70% 的光线,漫反射其余 30% 的光线;也可以对交点处 x > 0 的光线 进行漫反射,并吸收其他所有光线。



光线可以在任何边界上进行镜面反射 (左)、漫反射 (中)或被吸收 (右)。

复色光

默认情况下,"几何光学"接口中的射线是单色的,但可以轻松变为多色。您可以指定一组要释放的频率值或真空波长值。频率可以是表达式、显式值列表,也可以从分布中取样。

在 "几何光学"接口中,分离不同波长的光采用的主要机制是定义色散 (波 长相关)介质或使用衍射光栅。

色散介质

"材料库"中的许多内置材料均已使用基于科学文献编译的经验数据将折射率 定义为频率的函数。您也可以输入用户定义的表达式,其中显式包含真空波长 或频率。

此外,您还可以为其中一个内置光色散模型输入系数,如 Sellmeier 系数。"光 学材料库"中的许多玻璃材料都使用这些标准光色散模型,某些玻璃还包含热 -光色散系数,使折射率成为波长和温度的函数。



包含色散介质的棱镜可以将光分成不同的颜色。

衍射光栅

在衍射光栅上,可以释放许多衍射级的反射和透射射线。衍射光栅的内置边界 条件可以自动计算每个指定衍射级的方向,如果您知道与每个衍射级相关的透 射率或反射率,也可以指定这些方向。在频域中求解电磁波方程的波长尺度模 型可以生成这些数据。



Czerny-Turner 单色器: 交叉 Czerny-Turner 构型中准直镜、聚焦镜和衍射光栅的排列方 式,用于将复色光分成单色光。射线图中的颜色表达式与波长成正比。

强度和偏振

通过求解一组称为*斯托克斯参数*的四个变量,可以计算每条射线的强度。由于 射线表示电磁波,因此通常来说,不仅需要存储电磁场的大小,还需要存储有 关其矢量方向的信息,而斯托克斯参数可以轻松做到这一点。

在 "几何光学"接口中求解射线强度时,还会记录射线的完整偏振态。同一模型可以包含不同偏振态的任意组合,这意味着射线可以是以下任意偏振组合:

- 非偏振
- 圆偏振
- 椭圆偏振
- 线偏振, 或
- 部分偏振 (由用户定义偏振度,介于0到1之间)。

值得注意的是,求解射线强度时始终需要采用辐射度单位,而非光度单位。换 句话说,强度是以绝对项表示的能流,而非肉眼看到的表观通量。

反射线和折射线强度

即使对于材料不连续的最简单的反射和折射模型,有关射线偏振的信息也是至 关重要的。反射和折射系数取决于入射线是在入射平面发生偏振(p偏振)还 是垂直于入射平面发生偏振(s偏振)。菲涅尔方程明显地体现了这一相关性:

$$t_p = \frac{2n_1 \cos \theta_i}{n_2 \cos \theta_i + n_1 \cos \theta_t}$$
$$t_s = \frac{2n_1 \cos \theta_i}{n_1 \cos \theta_i + n_2 \cos \theta_t}$$
$$r_p = \frac{n_2 \cos \theta_i - n_1 \cos \theta_t}{n_2 \cos \theta_i + n_1 \cos \theta_t}$$
$$r_s = \frac{n_1 \cos \theta_i - n_2 \cos \theta_t}{n_1 \cos \theta_i + n_2 \cos \theta_t}$$

其中下标 p 和 s 分别指入射平面的偏振和与之正交的偏振;即 p 偏振和 s 偏振。

边界上的介质涂层

在实际中,两个具有不同折射率的域的折射边界不连续的情况非常少。大多数 透镜和反射镜都涂有一层或多层薄介电层,使反射和透射系数与菲涅尔系数的 简单实现明显不同。

如果您了解介质涂层中每一层的属性(每层的厚度和折射率,以及层的显示顺序),则可以直接将这些层构建成"材料不连续性"边界条件。随后,菲涅尔 系数会自动进行调整,除了包含这两个相邻域的折射率外,还会包含每一层的 属性。此外,您还可以指定其中一些介电层具有周期性,从而快速创建包含数 十或数百层的多层涂层。



分布式布拉格反射镜 (DBR):同一边界上可以添加多个薄介质膜,这些层可以设为包含 大量基本单元的周期性结构。图中绘制了含有 21 个介电层的 DBR 的反射率随波长的变 化。

除此之外,如果制造商提供了涂层的反射率或透射率,而非层属性,则您只需 在模型中输入反射率或透射率即可。指定的值不必为常数;如果模型中的光是 复色光,您还可以定义射线频率或波长的任意函数。

偏振可视化

通过在后处理过程中沿射线绘制偏振椭圆,可以查看不同边界条件对偏振的影响。这些椭圆表明射线是线偏振、圆偏振还是椭圆偏振。不仅如此,它们还表 明了偏振方向和电场矢量的旋转方向 (椭圆偏振和圆偏振),因此,可以轻松 分辨左旋和右旋圆偏振。



菲涅尔棱体中的线偏振光在内部发生两次反射(左)。其结果是,射线的偏振椭圆从线 性先变为椭圆,再变为圆。通过绘制圆偏振度随光程长度变化的情况(右)也可以体 现这一点。

控制偏振的其他边界条件

该模块提供用于操控射线强度和偏振的专用边界条件。这些边界条件不会影响 射线方向,但会改变出射射线的斯托克斯参数。这些条件包括:

- 理想线偏振片
- 线性波延迟器或圆形波延迟器
- 消偏器
- 定制的 4*4 Mueller 矩阵,几乎可以表示所有光学元件组合。



"线性波延迟器"教学案例:一束非偏振光线从左向右传播,依次通过线偏振片、四分 之一波长延迟器以及与第一个线偏振片正交的另一个线偏振片。射线图中显示了偏振椭 圆。颜色表达式表明了射线强度。

建模工具

除了上文描述的物理场特征外,"射线光学模块"还提供多种工具来帮助您设置模型和分析结果。

光学材料数据库

"射线光学模块"提供专用的材料数据库 - "光学"数据库, 其中包含 1,400 余 种材料的折射率信息。



光学材料数据库 (右)和典型输入材料的自由空间波长相关的折射率 (左)。

对于其中许多材料,折射率都与射线频率或真空波长呈函数关系。这些材料会 尽可能使用光色散模型,如 Sellmeier 系数,以便定义折射率的连续函数。某些 材料还包含热-光色散系数,使您可以更轻松、明确地将折射率定义为温度的 函数。 零件库

"射线光学模块"提供一个专用的"零件库",其中包含"射线光学"仿真中 常用的几何实体,包括球面和非球面透镜、反射镜、反光镜、棱镜和分光器。 这些几何零件已完全参数化,并包含各种预设选择,可供您方便地将抗反射涂 层应用于许多透镜的外表面。

零件库

普通三维球面透镜



"射线光学模块"的"零件库"。



白瞳中阶梯光栅光谱仪中的射线图。离轴抛物面镜和非球面透镜均由"射线光学模块" 的"零件库"提供。

射线-热耦合

如果射线光学模型中的折射率为复值,则虚部可以视为吸收项。通过复值折射 率传播的射线会因为此衰减损失部分能量,并可以将等量的能量作为热源项沉 积到周围域中。

专用的"射线加热"多物理场接口支持将吸收介质中射线传播产生的热量与 "固体传热"等其他物理场接口相结合,从而计算温度。"射线加热"接口支 持设置双向耦合,实现为热透镜效应等现象进行建模。



固体力学

热应力

射线光学与传热之前的双向耦合,包含热应力

变形



射线穿过吸收材料层,引起该层温度升高。

射线源

"几何光学"接口提供各种射线源或射线*释放特征*,用于指定射线的初始位置 和方向。同一模型支持使用任意数量不同类型的射线源。

栅格源

指定射线释放位置最直接的方式是使用基于栅格的释放。如下图所示,用于控制射线初始位置的方式有多种。

射线可以在每个释放位置朝一个方向向外传播,也可以呈球形分布、半球分 布、锥形分布或朗伯分布(余弦定律)向外传播。该模块还提供一个专用的 "太阳辐射"特征,用于根据地球表面的位置以及日期和时间对射线方向进行 初始化。



射线释放的形式可以呈柱面 (左一)、六边形 (左二)、矩形 (右二)或非均匀栅格 (右一)。

域和边界源

您可以从一组选定的域或边界释放射线。释放点的分布可以是均匀的、与用户定义的密度函数成正比、随机的,也可以基于底层有限元网格。



释放位置基于域网格(左)、非均匀密度表达式(中)以及沿边界均匀分布(右)。 该模块还提供一个专用的释放特征,光线可通过在受照面发生镜面反射或折射 进行释放。您只需提供外部辐射源的位置,即可释放反射线或折射线。

其他源

射线可以从几何中的选定点进行释放。在三维模型中,也可以在选定边进行释放。由此可见,射线可以从任意维度(模型的全维度)的几何实体进行释放。此外,也可以从文本文件加载释放位置和初始方向,其中,每列对应于一个位置或方向矢量分量。

"射线光学模块"可用于研究透镜系统中的单色像差。借助"光学像差"图或 "像差评估"特征可以实现这一功能。这些特征可以计算由透镜和反射镜系统 聚焦的射线的波前误差,然后用泽尼克多项式的线性组合来表示这一波前误 差。



泽尼克多项式,这是常用于描述单色像差的标准正交多项式基。

本节模拟一个简单的多元透镜。模型将采用由 Lautebacher 和 Brendel 研发的、 f/1.7 光圈、100.2 mm 焦距的双高斯透镜(Agfa Camera Werk Ag,美国专利号 2784643)。有关本次研究模拟的透镜的详细信息,请参见教学案例 Double Gauss Lens。透镜概览如下图所示。光学规格参数请参见下方表格。



双高斯透镜概览。视图显示轴上追踪的边缘光线以及另外4个场的主光线。

需要强调的是,"几何光学"接口使用的射线追踪方法本质上非顺序性的,因此,以任何顺序构建几何都能得到相同的结果。然而,在本节的仿真中,我们 通过重复插入 COMSOL "零件库"中的零件实例来构造透镜几何结构,即按 顺序插入每个透镜元件(包括光阑)。后续的每个透镜都相对于工作平面进行 放置,这些工作平面已在每个透镜(及光阑)零件实例中定义。

有关创建透镜几何结构的详细信息,请参见 Double Gauss Lens 教学案例的"附录 - 几何操作说明"。 Double Gauss Lens Parametric Sweep 教学案例对本教学案例进行了扩展,其中包含对多个波长和视场角进行参数化扫描。

有效半径 索引 名称 半径 厚度 (MM) 材料 (MM) (MM) ____ ____ 物体 00 œ 1 75.050 9.000 LaF3 33.0 透镜1 ____ ____ 270.700 0.100 _ 33.0 2 39.270 16.510 BaF11 27.5 透镜2 3 2.000 SF5 27.5 透镜3 00 ____ 10.990 19.5 ____ 25.650 ____ 4 13.000 18.6 ____ 光阑 ∞ 18.5 5 透镜4 -31.870 7.030 SF5 6 透镜 5 8.980 LaF3 21.0 ∞ ____ ____ -43.510 0.100 ____ 21.0 7 221.140 7.980 BaF11 23.0 透镜 6 ____ -88.790 23.0 61.418 _ ____ 42.5 ____ 图像 00 ____ ____

双高斯透镜光学规格参数

模型向导

注: 这些操作说明基于 Windows 用户界面,但同样适用于 Linux 和 Mac 系统, 只是略有不同。

- 2 在"选择空间维度"窗口中单击"三维"按钮 📄。
- 3 在"选择物理场"树的"光学" № > "射线光学" № 下单击"几何光学"
 .
- 4 单击"添加",然后单击"研究" 🔿 按钮。

5 在研究树的"预设研究"分支下,单击"射线追踪" № 。 "射线追踪"研究步骤的作用类似于"瞬态" № 研究步骤,但还包含一些适用于计算射线轨迹的其他设置和默认设置。为防止射线向外传播到任意远的距离,射线追踪需要设置最长时间或最大光程长度。

6 单击"完成" ☑ 按钮。

创建的"几何光学"接口及默认节点如下图所示。



全局定义

从文本文件加载"双高斯透镜"的全局参数。详细的透镜规格参数将在插入几 何序列时进行添加。

1 在"主屏幕"工具栏中单击"参数" P_i。此外,也可以在"模型开发器" 窗口中单击"参数" P_i 节点。

注: 在 Linux 和 Mac 上,"主屏幕"工具栏是指 Desktop 顶部附近的一组特定 控件。

- 2 在"参数" Pi 设置窗口的"标签"文本框中,键入参数 1: 透镜规格参数。 透镜规格参数将在插入几何序列时进行添加。
- 3 在"主屏幕"工具栏中单击"参数" Pi 并选择"添加参数"。这将添加另 一个节点,您可以在其中输入参数。

- 4 在"参数" Pi 设置窗口的"标签"文本框中,键入参数 2: 常规。
- 5 单击"从文件加载" 📂。
- 6 浏览到模型的"案例库"文件夹,然后双击文件 double_gauss_lens_parameters.txt。本练习中所用文件的位置根据安装 目录的不同而有所变化。例如,如果安装在硬盘上,文件路径应类似于 C:\Program Files\COMSOL\COMSOL54\Multiphysics\applications\。

参数列表应如下所示:

| 设置 | | | ▼ □ | |
|------------|--|------------|---------------------------|--|
| 参数 | | | | |
| | | | | |
| ▼ 参数 | | | | |
| * 名称 | 表达式 | 值 | 描述 | |
| lam vac | 550[nm] | 5.5E-7 m | Nominal vacuum wavel | |
| theta x | Oldeal | 0 rad | Nominal x field angle | |
| theta y | 0[deq] | 0 rad | Nominal y field angle | |
| N_ring | 18 | 18 | Number of hexapolar | |
| P_nom | 58.941[mm] | 0.058941 m | Nominal entrance pupi | |
| P_fac1 | -1.30 | -1.3 | Pupil shift constant 1 | |
| P_fac2 | -0.60 | -0.6 | Pupil shift constant 2 | |
| n_air | 1.000277 | 1.0003 | Refractive index of air | |
| vx | tan(theta_x) | 0 | Ray direction vector, x | |
| vy | tan(theta_y) | 0 | Ray direction vector, y | |
| vz | 1 | 1 | Ray direction vector, z | |
| z_stop | Tc_1+T_1+Tc_2+T_2+Tc_3+T_3 | m | Stop z-coordinate | |
| z_image | Tc_1+T_1+Tc_2+T_2+Tc_3+T_3+Tc_4+T_4+Tc_5+T_5+Tc_6+T_6+Tc_7+T_7 | m | Image plane z-coordin | |
| dx_pupil | P_fac*z_stop*tan(theta_x) | m | Pupil shift, x-coordinate | |
| dy_pupil | P_fac*z_stop*tan(theta_y) | m | Pupil shift, y-coordinate | |
| P_fac | $P_fac1+P_fac2*sin(sqrt(theta_x^2+theta_y^2))$ | -1.3 | Pupil shift factor | |
| nix | 0 | 0 | Global optical axis, x c | |
| niy | 0 | 0 | Global optical axis, y c | |
| niz | 1 | 1 | Global optical axis, z c | |
| | | | | |
| | | | | |
| ↑↓≒ | a 🔪 📂 🔚 🖳 🛪 | | | |
| 名称: | | | | |
| lam_vac | | | | |
| 表达式: | | | | |
| 550[nm] | | | | |
| 描述 | | | | |
| Nominal va | cuum wavelength | | | |

红色行表示缺少参数,因此无法计算表达式。其余参数将在从其他文件插入几 何序列时进行添加。

- 1 在"模型开发器"窗口中,单击"组件1(comp1)" 📄。
- 2 在"组件"的"设置"窗口中,定位到"常规"栏。
- 3 找到"网格坐标系的坐标"子栏。从"几何形函数阶次"列表中选择"三次"。 射线追踪算法基于离散几何计算反射线和折射线的方向,其中几何通过底层

有限元网格进行离散化。与使用线性和二次多项式的默认几何形函数阶次相比,采用三次时引入的离散误差通常较小。

几何

从文件插入准备好的几何序列。有关如何创建透镜几何的详细信息,请参见 Double Gauss Lens 教学案例的 "附录 - 几何操作说明"。

- 1 在"模型开发器"窗口的"组件 1 (comp1)"节点下,单击"几何 1" 🖄。
- 2 在 "几何" "设置" 窗口的 "标签" 文本框中, 键入双高斯透镜。
- 3 在"几何"工具栏中单击"插入序列" 🚮。
- 4 浏览到模型的"案例库"文件夹,然后双击文件

double_gauss_lens_geom_sequence.mph。插入完成后,透镜规格参数详 细信息将显示在"参数1:透镜规格参数"Pi 节点中。此外,现在还可以计 算"参数2:常规"节点中的所有表达式。此时的透镜规格参数列表应如下 所示:

| 设置 | | | | | - 🗆 |
|------------|--|------------|---------------------------|---|-----|
| 参数 | | | | | |
| | | | | | * |
| ▼ | | | | | |
| ** 名称 | 表达式 | 值 | 描述 | | |
| lam_vac | 550[nm] | 5.5E-7 m | Nominal vacuum wavel | | |
| theta_x | 0[deg] | 0 rad | Nominal x field angle | | |
| theta_y | 0[deg] | 0 rad | Nominal y field angle | E | |
| N_ring | 18 | 18 | Number of hexapolar | | |
| P_nom | 58.941[mm] | 0.058941 m | Nominal entrance pupi | | |
| P_fac1 | -1.30 | -1.3 | Pupil shift constant 1 | | |
| P_fac2 | -0.60 | -0.6 | Pupil shift constant 2 | | |
| n_air | 1.000277 | 1.0003 | Refractive index of air | | |
| vx | tan(theta_x) | 0 | Ray direction vector, x | | |
| vy | tan(theta_y) | 0 | Ray direction vector, y | | |
| vz | 1 | 1 | Ray direction vector, z | | Ξ |
| z_stop | Tc_1+T_1+Tc_2+T_2+Tc_3+T_3 | 0.0386 m | Stop z-coordinate | | |
| z_image | Tc_1+T_1+Tc_2+T_2+Tc_3+T_3+Tc_4+T_4+Tc_5+T_5+Tc_6+T_6+Tc_7 | 0.13711 m | Image plane z-coordin | | |
| dx_pupil | P_fac*z_stop*tan(theta_x) | -0 m | Pupil shift, x-coordinate | | |
| dy_pupil | P_fac*z_stop*tan(theta_y) | -0 m | Pupil shift, y-coordinate | | |
| P_fac | P_fac1+P_fac2*sin(sqrt(theta_x^2+theta_y^2)) | -1.3 | Pupil shift factor | Ŧ | |
| + 1 = | 🔪 🛌 🗖 着 👻 | | | | |
| () ♥ ·=> | | | | | |
| 省称: | | | | | |
| lam_vac | | | | | |
| 表达式: | | | | | |
| 550[nm] | | | | | |
| 描述: | | | | | |
| Nominal va | cuum wavelength | | | | |
| | | | | | |

- 5 在 "几何"工具栏中单击 "全部构建" ■。
 6 在 "图形"工具栏中单击 "缩放到窗口大小" → 按钮。几何结构应如下图 所示:



双高斯透镜的几何序列。光线从左向右(在正z方向传播)穿过透镜。

显示的几何尺寸以毫米为单位;这是系统自动调整的,以同导入的几何序列的 长度单位相匹配。

零件和零件实例说明

为节省时间,操作说明中省略了几何序列设置部分,但建议您查看"模型开发器"中的几何节点,了解几何序列的创建过程。

在"全局定义"⊕ > "几何零件" ∧ 节点下已加载两个零件定义:"球面透 镜 (三维)" ∧ 和"圆形平面环" ∧ 。在"组件 1" ■ > "几何 1" ∧ 节点 下已创建许多零件实例。

每个零件实例都调用一个零件定义,作为包含各种输入参数的几何操作说明的 子序列。例如,"普通球面透镜"零件接受表面曲率半径、透镜中心厚度和表 面直径输入参数,然后使用这些信息来构造透镜。

使用"射线光学模块"进行的光学仿真会大量用到零件实例,因为通过这些实例,可以将标准透镜规格参数轻松加载到几何序列中。





以下命令用于向每个透镜添加和指派材料属性。这些材料来自"射线光学模块"或"波动光学模块"提供的专用"光学材料库"。

- 1 在"材料"工具栏中,单击"添加材料" 🔐 以打开该窗口。
- 2 转到"添加材料"窗口。
- 3 在材料树中选择 "光学 > Glasses > Optical Glass Hoya > HOYA LAF3"。
- 4 在窗口工具栏中单击"添加到组件" 🕂 。
- 5 在材料树中选择 "光学 > Glasses > Optical Glass > HOYA BAF11"。
- 6 在窗口工具栏中单击"添加到组件" 🕂 。
- 7 在材料树中选择 "光学 > Glasses > Optical Glass Schott > SCHOTT N-SF5"。
- 8 在窗口工具栏中单击"添加到组件" 🕂 。

9 在"材料"工具栏中,单击"添加材料" 🔐 以关闭该窗口。

接下来,将此材料指派给相关透镜:

- 1 在"材料"HOYA LAF3 (mat1)的"设置"窗口中,定位到"几何实体选择"栏。
- 2 从"选择"列表中,选择"透镜材料1"。 这是几何序列中定义的"累积选择"。6个透镜都分别指派了三种透镜材料 选择的一种。
- 3 在 "材料" HOYA BAF11 (mat2) 的 "设置"窗口中,定位到 "几何实体选 择"栏。
- 4 从"选择"列表中,选择"透镜材料2"。
- 5 在"材料" SCHOTT N-SF5 (mat3) 的"设置"窗口中,定位到"几何实体选择"栏。
- 6 从"选择"列表中,选择"透镜材料3"。

材料选择应如下图所示。



HOYA LaF3 (左)、HOYA BaF11 (中)和SCHOTT N-SF5 (右)玻璃对应的选择。

物理场接口

我们已经在模型中插入几何与材料,接下来设置物理场接口。在添加任何射线 源或边界条件之前,我们先更改一些控制射线追踪仿真的物理场接口属性。

- 2 在"最大二次射线数"文本框中键入 0。本教学案例不追踪杂散光,因此透 镜表面不会产生反射线。
- 3 选中"将几何法向用于射线-边界相互作用"复选框。这样可以确保使用几何法向在所有折射面上应用边界条件,适用于单物理场仿真中最高精度的射线追迹,其中的几何结构不发生变形。

在追踪射线时无需使用以下变量,但在后处理过程中可能会用到。

1 定位到"附加变量"栏。选中"计算光程长度"复选框。

- 2 选中"反射计数"复选框。
- 3 选中"存储射线状态数据"复选框。

介质属性

上面添加的每种材料都包含光色散系数,这些系数可用于计算随波长变化的折 射率。

- 1 在"模型开发器"窗口的"组件1(comp1)>几何光学(gop)"节点下,单击 "介质属性1" ♣。
- 2 在"介质属性"的"设置"窗口中,定位到"介质属性"栏。
- 3 从"光色散模型"列表中选择"从材料获取色散模型"。

材料不连续性

"材料不连续性"是"几何光学"接口中的默认边界条件,它基于边界任一侧的折射率对射线进行反射和折射。

- 1 在"模型开发器"窗口的"组件1(comp1)>几何光学(gop)"节点下,单击 "材料不连续性1" —。
- 2 在"材料不连续性"的"设置"窗口中,定位到"要释放的射线"栏。
- 3 从"释放反射线"列表中,选择"从不"。

注:"几何光学"接口始终在"材料不连续性"的位置使用确定性射线分裂法,从而产生反射线和折射线,但以下情况除外:(i)反射线被刻意抑制(如本例);(ii)发生全内反射;或(iii)需要计算强度和/或功率,且反射线的强度非常低。

射线属性

- 1 在"模型开发器"窗口的"组件1(comp1)>几何光学(gop)"节点下,单击 "射线属性1" ♪>。
- 2 在"射线属性"的"设置"窗口中,定位到"射线属性"栏。
- 3 在"真空波长"文本框中,键入 lam_vac。此波长已在"参数"节点中定义。

从栅格释放

使用"参数"节点中定义的物理量从六边形栅格释放射线。

- 1 在"物理场"工具栏中,单击"全局" 🕸 并选择"从栅格释放" 💥。
- 2 在"从栅格释放"的"设置"窗口中,定位到"初始坐标"栏。
- 3 从"栅格类型"列表中选择"六边形"。径向位置数将决定发射的射线总数。由下图可知,六边形分布可以产生均匀的空间分布。



六边形栅格。这些栅格从左到右分别包含2个、5个和10个径向环,每种情况下发射的 射线数为19、91和331。

4 按照下图指定"中心位置"(q_c)矢量:

| 中心 | x位置: | | |
|----|----------|---|---|
| qc | dx_pupil | x | |
| | dy_pupil | у | m |
| | -5[mm] | z | |

六边形栅格的中心位置([xc,yc,zc]=[dx,dy,dz])将根据视场角发生变化, 从而确保主光线在光轴上的光阑位置处重合。

5 按照下图指定圆柱轴向 (r_c) 矢量:

| 圆柱 | 注轴向: | | |
|----|------|---|---|
| | nix | x | |
| ۲c | niy | У | 1 |
| | niz | z | |

圆柱轴向与全局光轴同向,为正 z 方向。这是垂直于射线分布的方向,因此,释放点的六边形栅格将位于与 xy 平面平行的平面上。

- 6 在半径 (R_c) 文本框中, 键入 P_nom/2。标称瞳孔直径为 P_nom。
- 7 在"径向位置数"(N_c)文本框中,键入 N_ring。在编辑框下方,"设置"窗 口将报告六边形栅格共包含 1027 个释放位置。
- 8 定位到"射线方向矢量"栏。按照下图指定"射线方向矢量"(L₀):

| 射线 | 防向矢量: | | |
|----|-------|---|---|
| | vx | x | |
| Lo | vy | У | 1 |
| | vz | z | |

使用"参数"节点中定义的视场角可以计算射线方向矢量。在本例中,视场 角为零,但要重新计算视场角不为零的情况也很方便,只需调整模型参数即 可。

障碍物

- 在"物理场"工具栏中,单击"边界" ■并选择"壁" ■。
 "壁"是一种通用边界条件,可以吸收射线,也可以对其进行镜面反射、漫反射,或沿用户定义的方向反射。在本例中,所有透镜边缘和孔径光阑均已定义吸收"壁"。传播到这些表面的任何射线都将被移除。
- 2 在"壁""设置"窗口的"标签"文本框中,键入障碍物。
- 3 定位到"边界选择"栏。从"选择"列表中,选择"透镜障碍物"。这些 选择是在几何序列中指定的,包括通光孔径和透镜边缘外部的透镜表面。
- 4 定位到"壁条件"栏。从"壁条件"列表中选择"消失"。
- 5 在"物理场"工具栏中,单击"边界" 📻 并选择"壁" 📻。
- 6 在"壁""设置"窗口的"标签"文本框中,键入光阑。
- 7 定位到"边界选择"栏。从"选择"列表中,选择"孔径光阑"。
- 8 定位到"壁条件"栏。从"壁条件"列表中选择"消失"。

像平面

- 1 在"物理场"工具栏中,单击"边界" 📄 并选择"壁" 📻。
- 2 在"壁""设置"窗口的"标签"文本框中,键入像平面。
- 3 定位到"边界选择"栏。从"选择"列表中选择"像平面"。系统将使用 默认的"壁条件"(冻结)。到达像平面的任何射线都将停止传播,但不会 从仿真中移除。

网格

此仿真可以使用默认的物理场控制网格设置。 1 在 "网格"工具栏中单击 "构建网格" ■。

研究

查看"研究1" \infty 的设置:

- 1 在"射线追踪" 涂 的"设置"窗口中,定位到"研究设置"栏。
- 2 从 "时间步明细"列表中,选择 "指定最大路径长度"。
- 3 从"长度单位"列表中选择 mm。
- 4 在"长度"文本框中键入 0 200。最大光程长度足以使采用大视场角释放的 射线到达像平面。

注: "射线追踪"研究步骤与"瞬态"研究步骤类似,但其默认时间步大小和 终止准则有所不同。对于此研究,最大时间步根据最大路径长度指定,这一长 度可基于几何尺寸轻松计算得出。还请注意,虽然仅指定了两个时间步(对应 于 0 和 200 mm 的光程长度),但该研究仍会于中间时间步在所有材料不连续 处使射线发生折射,即使这些时间步与指定的任何输出时间步都不匹配也是如 此。 射线追踪算法可以在连续时间步之间或在求解器采用的光程长度间隔上应用大量的反射和折射。默认情况下,每条射线在每个时间步发生的最大相互作用数为1000,但该值可以在物理场接口的"高级设置"中进行调整。

5 在"主屏幕"工具栏中单击"计算"=。

结果

通过以下步骤,可以创建两个不同的射线图和光斑图。

射线图

在 "几何光学"接口中首次运行 "射线追踪"研究时,默认情况下系统会生成 "射线轨迹"图。您可以在绘图设置中使用任意表达式对射线着色,还可以 使用逻辑表达式对其进行过滤 (从而在视图中将其隐藏)。

首先,稍微修改默认的"射线轨迹"图并生成一个副本。

射线轨迹

- 1 在"模型开发器"窗口的"结果" № 节点下,单击"射线轨迹 (gop)"。这 是一个"三维绘图组" 🛅。
- 2 在"三维绘图组""设置"窗口的"标签"文本框中,键入射线图 1。
- 3 定位到"绘图设置"栏。清除"绘制数据集边"复选框。
- 4 单击以展开"标题"栏。从"标题类型"列表中选择"无"。
- 5 右键单击"结果" 📠 > "射线图 1" 🛅 并选择"生成副本" 🗔。
- 6 在"三维绘图组""设置"窗口的"标签"文本框中,键入射线图 2。

截面

截面用于渲染透镜横截面和创建光斑图。

- 1 在"结果"工具栏中,单击"截面"。第一个截面(截面1)位于矢状平面 中。此截面可以使用默认设置。
- 2 在"结果"工具栏中,单击"截面"。
- 3 定位到"数据"栏。从"数据集"列表中选择"射线1"。
- 4 定位到"平面数据"栏。从"平面"列表中选择"xy平面"。
- 5 在 "z坐标"文本框中键入 z_image。第二个截面 (截面 2) 与像平面重 合。

射线图1

- 第一个射线图显示透镜的横截面,其中的射线根据光程长度着色。
- 1 在"模型开发器"窗口中,展开"结果" 📠 > "射线图 1" 🛅 节点。

过滤器1

- 在 "模型开发器"窗口中,展开"结果"
 > "射线图 1"
 ▶ 5 "射线轨 迹 1"
 逊 节点,然后单击"过滤器 1"
 ➡ 。
- 2 定位到"射线选择"栏。从"包含的射线"列表中,选择"逻辑表达式"。
- 3 在 "包含逻辑表达式"文本框中键入 at(0,abs(gop.deltaqx)<0.1[mm]) && gop.fs==2。这样可以确保仅渲染到达像平面的射线,即,射线最终状态 (fs)为2(冻结)。此外,该视图中仅渲染弧矢光线。

表面1

- 1 在"射线图 1"工具栏中,单击"表面" 🚬。
- 2 定位到"数据"栏。从"数据集"列表中选择"截面1"。这是上面定义的 矢状截面。
- 3 定位到"着色和样式"栏。从"着色"列表中选择"均匀"。
- 4 从"颜色"列表中选择"灰色"。

线1

- 1 在"射线图 1"工具栏中,单击"线" 🔂。
- 2 定位到"数据"栏。从"数据集"列表中选择"截面1"。
- 3 定位到"着色和样式"栏。从"着色"列表中选择"均匀"。
- 4 从"颜色"列表中选择"黑色"。
- 5 在"射线图 1"工具栏中,单击"绘制" 🗔。
- 6 在窗口工具栏中单击"缩放到窗口大小" 斗。该图应如下所示。



射线图 2

在第二个射线图中,我们将根据射线在像平面中的位置到质心的径向距离对其 着色。这样做可以对形成像平面光斑像差的射线进行可视化。 首先,添加网格图,将透镜渲染为实体:

网格1

- 1 在"射线图 2"工具栏中,单击"网格" 区。
- 2 定位到"层"栏。从"层"列表中选择"体"。
- 3 定位到"颜色"栏。从"单元颜色"列表中选择"灰色"。
- 4 从"线框颜色"列表中选择"灰色"。

表面1

- 1 在"射线图 2"工具栏中,单击"表面"。
- 2 定位到"着色和样式"栏。从"着色"列表中选择"均匀"。
- 3 从"颜色"列表中选择"灰色"。
- 4 右键单击"结果" 匾 >"射线图 2" 盲 > "表面 1" 并选定"选择"。
- 5 仅选择"边界"2和13。分别对应"孔径光阑"和"像平面"表面。

颜色表达式

 在 "模型开发器"窗口中,展开"结果" [≥ "射线图 2" [≥ "射线轨 迹 1" 承 节点,然后单击"颜色表达式 1" 20。 2 定位到"表达式"栏。在"表达式"文本框中键入at('last',gop.rall)。这是相对于像平面质心的径向坐标。 这一颜色表达式利用"射线追踪"研究的类时性质,即,使用"at"算子 根据射线在特定时间点(本例中为"last")的一些特性对沿着完整路径 传播的射线进行着色。

3 从"单位"列表中选择 µm。

过滤器

- 2 定位到"射线选择"栏。从"包含的射线"列表中,选择"逻辑表达式"。
- 3 在"包含逻辑表达式"文本框中,键入 gop.fs==2。仅绘制到达像平面的射线。
- 4 在"射线图 2"工具栏中,单击"绘制" 🗔 。
- 5 在窗口工具栏中单击"缩放到窗口大小"→。调整视图方向,使物平面中的颜色表达式清晰可见。该图应如下方第一幅图所示。 正如上面提到的,图中的射线根据它们到质心的径向距离进行着色。这样做可以对形成整体光斑大小的主要射线进行可视化。

我们可以使用其他视场角参数来重复执行该研究。下方第二幅图显示 theta_x = 10[deg]时的结果,其中的射线也是根据它们到质心的径向距离 进行着色。从本例可以明显看出,射线在像平面上的位置与这些射线在入射 光瞳处的分布之间的关系完全不同。





光斑图

通过以下步骤,可以创建光斑图并添加定制的颜色表达式。

二维绘图组

- 1 在"结果"工具栏中,单击"二维绘图组".
- 2 在"二维绘图组""设置"窗口的"标签"文本框中,键入光斑图。
- 3 单击以展开"标题"栏。从"标题类型"列表中选择"无"。
- 4 定位到"绘图设置"栏。选中"x轴标签"复选框。
- 5 在关联文本框中键入 x 坐标。
- 6 选中"y轴标签"复选框。
- 7 在关联文本框中键入 y 坐标。
- 8 定位到"颜色图例"栏。选中"显示单位"复选框。

庞加莱图

- "庞加莱图"是用于创建光斑图的多种方式之一。
- 1 在 "光斑图"工具栏中,单击 "更多绘图"并选择 "庞加莱图" 📑。
- 2 定位到"数据"栏。从"截面"列表中选择"截面 2"。
- 3 定位到"着色和样式"栏。选中"半径比例因子"和"固定大小"复选 框。

颜色表达式

- 1 右键单击 "庞加莱图 1"并选择 "颜色表达式" 🔊 。
- 2 定位到"表达式"栏。在"表达式"文本框中键入 at (0, gop.rall)。这是 相对于入射光瞳质心的径向坐标。这样做可以对每条射线的原点进行可视 化。

标注1

- 1 在"模型开发器"窗口的"结果"节点下,右键单击"光斑图"并选择 "标注" I 。
- 2 定位到"数据"栏。从"数据集"列表中选择"研究 1/ 解 1 (sol1)"。
- 3 定位到 "标注"栏。在 "文本"框中键入 Wavelength: \$\lambda\$ =
 eval(lam_vac/1[nm]) nm \\ Field:
 \$\left[\theta_x,\theta_y\right] =
 \left[eval(theta_x/1[deg])^\circ,eval(theta_y/1[deg])^\circ\r
 ight]\$。
- 4 选中"允许计算表达式"复选框。
- 5 从"几何层"列表中选择"全局"。

40 |

- 6 定位到"位置"栏。在X文本框中键入gop.qavex。在Y文本框中键入gop.qavey+1.5*gop.rmaxall。
- 7 单击以展开"高级"栏。在"表达式精度"文本框中键入4。
- 8 定位到"着色和样式"栏。选中"LaTeX标记"复选框。
- 9 清除"显示点"复选框。
- 10从"锚点"列表中选择"中间偏上"。

11选中"显示框架"复选框。

标注2

- 1 右键单击"结果>光斑图>标注1"并选择"生成副本" []。
- 2 定位到 "标注"栏。在 "文本"框中键入 Size: r\$_\textrm{rms} = eval(gop.rrms/1[um])~\mu\$m; r\$_\textrm{max} = eval(gop.rmaxall/1[um])~\mu\$m \\ Centroid: [x,y] = [eval(gop.qavex),eval(gop.qavey)] mm。
- 3 定位到"位置"栏。在 Y 文本框中键入 gop.qavey-1.5*gop.rmaxall。
- 4 定位到"高级"栏。在"表达式精度"文本框中键入3。
- 5 定位到"着色和样式"栏。从"锚点"列表中选择"中间偏下"。
- 6 在"光斑图"工具栏中,单击"绘制" ≥ 。
- 7 在窗口工具栏中单击"缩放到窗口大小"→。将得到的图像与下方第一幅 图进行比较。

如上所述,颜色表达式表明了射线在入射光瞳处的位置。这对前述的射线图 进行了补充说明。

然后,我们将视场角参数设为 theta_x = 10[deg],重复执行这一研究。分析结果如下方第二幅图所示。与射线图相同,借助定制的颜色表达式,我们可以清楚地分辨形成整体光斑大小的主要射线。



42 |