

光学系统设计 (Zemax 初学手册)

蔡长青

ISUAL 计画团队

国立成功大学物理系

(第一版, 1999 年 7 月 29 日)

前言

整个中华卫星二号“红色精灵”科学酬载计画, 其量测仪器基本上是个光学仪器。所以光学系统的分析乃至设计与测试是整个酬载发展重要一环。

这份初学手册提供初学者使用软体作光学系统设计练习, 整个需要 Zemax 光学系统设计软体。它基本上是 Zemax 使用手册中 tutorial 的中文翻译, 由蔡长青同学完成, 并在 Zemax E. E. 7.0 上测试过。由于蔡长青同学不在参与“红色精灵”计画, 所以改由黄晓龙同学接手进行校稿与独立检验, 整个内容已在 Zemax E. E. 8.0 版上测试过。我们希望藉此初学手册(共有七个习作)与后续更多的习作与文件, 使团队成员对光学系统设计有进一步的掌握。(陈志隆注)

(回内容纲目)

习作一: 单镜片(Singlet)

你将学到: 启用 Zemax, 如何键入 wavelength, lens data, 产生 ray fan, OPD, spot diagrams, 定义 thickness solve 以及 variables, 执行简单光学设计最佳化。

设想你要设计一个 F/4 单镜片在光轴上使用, 其 focal length 为 100mm, 在可见光谱下, 用 BK7 镜片来作。

首先叫出 ZEMAX 的 lens data editor(LDE), 什么是 LDE 呢? 它是你要的工作场所, 譬如你决定要用何种镜片, 几个镜片, 镜片的 radius, thickness, 大小, 位置……等。

然后选取你要的光, 在主选单 system 下, 圈出 wavelengths, 依喜好键入你要的波长, 同时可选用不同的波长等。现在在第一列键入 0.486, 以 microns 为单位, 此为氢原子的 F-line 光谱。在第二、三列键入 0.587 及 0.656, 然后在 primary wavelength 上点在 0.486 的位置, primary wavelength 主要是用来计算光学系统在近轴光学近似(paraxial optics, 即 first-order optics)下的几个主要参数, 如 focal length, magnification, pupil sizes 等。

再来我们要决定透镜的孔径有多大。既然指定要 F/4 的透镜, 所谓的 F/#是什么呢? F/#就是光由无限远入射所形成的 effective focal length F 跟 paraxial entrance pupil 的直径的比值。所以现在我们需要 aperture 就是 $100/4=25(\text{mm})$ 。于是从 system menu 上选 general data, 在 aper value 上键入 25, 而 aperture type 被 default 为 Entrance Pupil diameter。也就是说, entrance pupil 的大小就是 aperture 的大小。

回到 LDE, 可以看到 3 个不同的 surface, 依序为 OBJ, STO 及 IMA。OBJ 就是发光物, 即光源, STO 即 aperture stop 的意思, STO 不一定是光照过来所遇到的第一个透镜, 你在设计一组光学系统时, STO 可选在任一透镜上, 通常第一面镜就是 STO, 若不是如此, 则可在 STO 这一栏上按滑鼠, 可前后加入你要的镜片, 于是 STO 就不是落在第一个透镜上了。而 IMA 就是 imagine plane, 即成像平面。回到我们的 singlet, 我们需要 4 个面 (surface), 于是在 STO 栏上, 选取 insert cifter, 就在 STO 后面再插入一个镜片, 编号为 2, 通常 OBJ 为 0, STO 为 1, 而 IMA 为 3。

再来如何输入镜片的材质为 BK7。在 STO 列中的 glass 栏上, 直接打上 BK7 即可。又

孔径的大小为 25mm, 则第一面镜合理的 thickness 为 4, 也是直接键入。再来决定第 1 及第 2 面镜的曲率半径, 在此分别选为 100 及-100, 凡是圆心在镜面之右边为正值, 反之为负值。而再令第 2 面镜的 thickness 为 100。

现在你的输入资料已大致完毕。你怎么检验你的设计是否达到要求呢? 选analysis中的 fans, 其中的Ray Aberration, 将会把transverse的ray aberration对pupil coordinate作图。其中ray aberration是以chief ray为参考点计算的。纵轴为EY的, 即是在Y方个的aberration, 称作tangential或者YZ plane。同理X方向的aberration称为XZ plane或sagittal。

Zemax主要的目的, 就是帮我们矫正defocus, 用solves就可以解决这些问题。solves是一些函数, 它的输入变数为curvatures, thickness, glasses, semi-diameters, conics, 以及相关的parameters等。parameters是用来描述或补足输入变数solves的型式。如curvature的型式有chief ray angle, pick up, Marginal ray normal, chief ray normal, Aplanatic, Element power, concentric with surface等。而描述chief ray angle solves的parameter即为angle, 而补足pick up solves的parameters为surface, scale factor两项, 所以parameters本身不是solves, 要调整的变数才是solves的对象。

在 surface 2 栏中的 thickness 项上点两下, 把 solve type 从 fixed 变成 Marginal Ray height, 然后 OK。这项调整会把透镜边缘的光在光轴上的 height 为 0, 即 paraxial focus。再次 update ray fan, 你可发现 defocus 已经不见了。但这是最佳化设计吗? 再次调整 surface 1 的 radius 项从 fixed 变成 variable, 依次把 surface 2 的 radius, 及放弃原先的 surface 2 中 thickness 的 Marginal Ray height 也变成 variable。再来我们定义一个 Merit function, 什么是 Merit function 呢? Merit function 就是把你理想的光学要求规格定为一个标准(如此例中 focal length 为 100mm), 然后 Zemax 会连续调整你输入 solves 中的各种 variable, 把计算得的值与你订的标准相减就是 Merit function 值, 所以 Merit function 值愈小愈好, 挑出最小值时即完成 variable 设定, 理想的 Merit function 值为 0。

现在谈谈如何设 Merit function, Zemax 已经 default 一个内建的 merit function, 它的功能是把 RMS wavefront error 减至最低, 所以先在 editors 中选 Merit function, 进入其中的 Tools, 再按 Default Merit Function 键, 再按 ok, 即我们选用 default Merit function, 这还不够, 我们还要规定给 merit function 一个 focal length 为 100 的限制, 因为若不给此限制则 Zemax 会发现 focal length 为 ∞ 时, wavefront aberration 的效果会最好, 当然就违反我们的设计要求。所以在 Merit function editor 第 1 列中往后插入一列, 即显示出第 2 列, 代表 surface 2, 在此列中的 type 项上键入 EFFL(effective focal length), 同列中的 target 项键入 100, weight 项中定为 1。跳出 Merit function editor, 在 Tools 中选 optimization 项, 按 Automatic 键, 完毕后跳出来, 此时你已完成设计最佳化。重新检验 ray fan, 这时 maximum aberration 已降至 200 microns。

其他检验 optical performance 还可以用 Spot Diagrams 及 OPD 等。从 Analysis 中选 spot diagram 中的 standard, 则该 spot 大约为 400 microns 上下左右交错, 与 Airy diffraction disk 比较而言, 后者大约为 6 microns 交错。

而 OPD 为 optical path difference(跟 chief ray 作比较), 亦从 Analysis 中挑选, 从 Fans 中的 Optical Path, 发现其中的 aberration 大约为 20 waves, 大都 focus, 并且 spherical, spherochromatism 及 axial color。Zemax 另外提供一个决定 first order chromatic aberration 的工具, 即 the chromatic focal shift plot, 这是把各种光波的 back focal length 跟在 paraxial 上用 primary wavelength 计算出 first order 的 focal length 之间的差异对输出光波的 wavelength 作图, 图中可指出各光波在 paraxial focus 上的 variation。从 Analysis 中 Miscellaneous 项的 Chromatic Focal Shift 即可叫出。

(回内容纲目)

● 习作二：双镜片

你将学到：画出 layouts 和 field curvature plots, 定义 edge thickness solves, field angles 等。

一个双镜片是由两片玻璃组成，通常黏在一起，所以他们有相同的 curvature。藉著不同玻璃的 dispersion 性质，the chromatic aberration 可以矫正到 first order 所以剩下的 chromatic aberration 主要的贡献为 second order，于是我们可以期待在看 chromatic focal shift plot 图时，应该呈现出 parabolic curve 的曲线而非一条直线，此乃 second order effect 的结果（当然其中 variation 的 scale 跟 first order 比起来必然小很多，应该下降一个 order）。

跟习作一一样，我们仍然要设计一个在光轴上成像，focal length 为 100mm 的光学系统，只不过这次我们用两块玻璃来设计。

选用 BK7 和 SF1 两种镜片，wavelength 和 aperture 如同习作一所设，既然是 doublet，你只要在习作一的 LDE 上再加入一面镜片即可。所以叫出习作一的 LDE，在 STO 后再插入一个镜片，标示为 2，或者你也可以在 STO 前插入一面镜片标示为 1，然后在镜片上的 surface type 上用鼠标按一下，然后选择 Make Surface Stop，则此地一面镜就变成 STO 的位置。在第一、第二面镜片上的 Glass 项目键入 BK7 即 SF1，因为在 BK7 和 SF1 之间并没有空隙，所以此 doublet 为相黏的二镜片，如果有空隙则需 5 面镜因为在 BK7 和 SF1 间需插入另一镜片，其 glass type 为 air。现在把 STO 早地二面镜的 thickness 都 fixed 为 3，仅第 3 面镜的 thickness 为 100 且设为 variable，既然要最佳化，还是要设 merit function，注意此时 EFFL 需设在第三面镜上，因为第 3 面镜是光线在成像前穿过的最后一面镜，又 EFFL 是以光学系统上的最后一块镜片上的 principle plane 的位置起算。其他的 merit function 设定就一切照旧。

既然我们只是依习作一上的设计规范，只不过再加一面 SF1 镜片而已，所以其他的 merit function 设定就一切照旧。现在执行 optimization，程序如同习作一，在 optimization 结束后，你再叫出 Chromatic Focal Shift 来看看，是否发现 first order 的 chromatic aberration 已经被 reduced，剩下的是 second order chromatic aberration 在主宰，所以图形呈现出来的是一个 parabolic curve，而且现在 shift 的大小为 74 microns，先前习作一为 1540 microns。

再看其他的 performance 效果，叫出 Ray aberration，此时 maximum transverse ray aberration 已由习作一的 200 microns 降至 20 microns。而且 3 个不同波长通过原点的斜率大约一致，这告诉我们对每个 wavelength 的 relative defocus 为很小。再者，此斜率不为 0（比较习作一 Fig E1-2），这告诉我们什么讯息呢？如果斜率为 0，则在 pupil coordinate 原点附近作一些变动则并不产生 aberration 代表 defocus 并不严重，而 aberration 产生的主要因素为 spherical aberration。故相对于习作一（比较他们座标的 scale 及通过原点的斜率），现在 spherical aberration 已较不严重（因为 aberration scale 已降很多），而允许一点点的 defocus 出现，而出现在 rayfan curve 的 S 形状，是典型的 spherical balanced by defocus 的情况。现在我们已确定得到较好的 performance，但实际上的光学系统长的什么样子呢？选择 Analysis, Layout, 2D Layout，除了光学系统的摆设外，你还会看到 3 条分别通过 entrance pupil 的 top, center, bottom 在空间被 trace 出来，他们的波长是一样的，就是你定的 primary wavelength（在此为 surface 1）。这是 Zemax default 的结果。

但是现在还有一个问题，我们凭直觉定出 STO 的 thickness 为 3，但是真正在作镜片的时候，STO 和 surface 2 镜面会不会互相交错穿出，即在 edge 的 thickness 值为正数或负数，还有是不是应该改一下设计使 lens 的 aperture 比 diameter 小，如此我们可预留些边缘空间来磨光或架镜。

于是我们可能更改的是 diameter, STO 的 thickness 来解决上述问题。先在 STO 的 diameter 上键入 14 来盖过 12.5，此时会有一个“U”字出现代表 user define，现在设想我们要 edge thickness 固定为 3mm，可是你或许会问这样系统岂不是弄乱了吗？defocus 又会出现，关键是再一次执行 optimization 即可。在 STO 的 thickness 上按一下，选择 Edge Thickness 项目，则会出现“Thickness”及“Radial Height”两项，设 thickness 为 3 及 radial height 为 0(若 radial height 为 0，则 Zemax 就使定 user define 的 semi-thickness)按 OK 跳出，你会发现 STO 的 thickness 已改变，且会出现一个“E”字代表 an active thickness solve 在该项的 parameter 上。

既然 edge thickness 已改变，所以 focal length 也一定有些许变动，为了维持原有的 EFL，现在再执行 optimization 一次即可。现在我们想看看 off-axis 的 performance，从 system 的 Fields 中的 Field Data，选用 3 个 field 来作比较，怎么选呢？在第 2 及第 3 个列中的“Use”项中各按一下，在第 2 列的 y field 行中键入 7(即 7 degree)，在第 3 列中键入 10，第一列则让它为 0 即持续 on-axis。而设所有的 x field 皆为 0，对一个 rotational 对称的系统而言，他们的值很小，按 OK 键跳出。现在 Update rayfan，你可看到如 Figure E2-4 之图。图中 T 代表 tangential，S 为 sagittal，结果显示 off-axis 的 performance 很差，这是因为一开始我们就设计系统在 on-axis 上来作 optimization，这些 aberration 可以用 field curvature plot 来估计，选 Analysis 中，Miscellaneous 的 Field Curv/Dist。则出现如 Figure E2-5 的图，左图表示 shift in paraxial focus 为 field angle 的函数，而右图为 real ray 的 distortion，以 paraxial ray 为参考 ray。在 field curvature plot 的讯息也可从 rayfans 中得知，为 field curvature plot 是正比于在 rayfan plot 中通过原点的斜率。

(回内容纲目)

● 习作三：牛顿望远镜

你将学到：使用 mirrors, conic constants, coordinate breaks, three dimensional layouts, obscurations。

牛顿望远镜是最简单的矫正所有 on-axis aberrations 的望眼镜。牛顿望远镜是利用一个简单的 parabolic mirror 完美地矫正所有 order 的 spherical aberration，因为我们只在 optical axis 上使用，除 spherical aberration 外并没有其他的 aberration。

假想要设计一个 1000mm F/5 的望远镜，我们需要一个具有 2000mm 的 curvature 及 200mm 的 aperture。在 surface 1 即 STO 上的 curvature 项中键入 -2000 mm，负号表示对 object 而言，其曲面为 concave，即曲面对发光源而言是内弯的。在 thickness 项中键入 -1000，负路表示光线没有透过 mirror 而是反射回来，在 Glass 项中键入 MIRROR，最后在 System 的 General 项中的 aperture 中键入 200。

Wavelength 选用 0.550，field angle 则为 0。现在看看 spot diagram，你会看到一个 77.6 microns RMS 的 spot diagram，而一个很方便估算 image quality 的方法就是在 spot diagram 的

顶端上再 superimpose 一个 Airy diffraction ring。从 spot diagram 的 menu bar 选择 Setting, 在 Show Scale 上选 "Airy Disk", 结果如图 Figure E3-1 所示, 你会发现和选 "scale bar" 的结果是一样的。图中所列的 RMS spot size 选 "Airy Disk" 为 77.6 microns。光线并没有 diffraction-limited 的原因是因为我们还没有设定 conic constant。先前我们设定的 curvature 的值为 -2000 只是定义一个球面, 若要定义一个抛物面镜, 则在 STO 的 Conic 项中尚需键入 -1, 接下来 Update spot diagram, 你会看到 "Airy ring" 为一个黑圈, 而光线则聚集在圈内中心上, RMS 值为 0。

可惜的是, 成像的位置很不好, 所谓的不好是它位于在入射光的路径上, 若你要看这个像的话, 你的观看位置刚好挡住入射光。改善的方法是在反射镜的后面再放一个折镜, fold mirror(后面是相对于成像点而言)。这个 fold mirror 相对于光轴的倾斜角度为 45°, 把像往上提离光轴。因为进来的光束为 200mm 宽, 因此成像平面至少在离光轴 100mm 的上方, 如此"看"像的时候才不会挡住入射光。我们决定用 200mm, 而 fold mirror 离先前的反射镜面为 800mm, 因为 $200+800=1000$ 等于原先在 STO 上的 thickness, 即成像"距离"不变。操作如下, 先把 STO 的 thickness 改为 -800, 然后在 imagine plane 前插入一个 dummy surface, 为何要插入 dummy surface 呢? 又 dummy surface 是什么呢? dummy surface 的目的只是在帮助我们吧 fold mirror 的位置标示出来, 本身并不具真实的光学镜片意义, 也不参与光学系统的任何"反应", 所以称为 dummy surface。怎么插入 dummy surface 呢? 先在 image plane 前面插入一个 surface, 这个 surface 很快地就会被转变成 fold mirror, 但是你不要自己在 surface type 处去改变它成为 fold mirror, 而是选 Tools 中的 Add Fold Mirror, 并在其"fold surface"处选"2"代表定义 surface 2 为 fold mirror, 完成后你将看到如 Zemax P.31 页中 LED 的表。或许你会问, 表中 surface type 处在 surface 2 及 4 中皆为 Coord Break, 这又是什么? coordinate break surface 是在目前的系统内定义一个新座标系统, 它总是用 dummy surface 的观念用来作 ray tracing 的目的。而在描述此新座标系统中, 通常选用 6 个不同参数, 即 x-decenter, y-decenter, tiltx, tilty, tiltz 及一个 flag 来指示 tilting 或 decentration 的 order。

要注意的是, coordinate break 总是相对于 "current" 而 "global" 的 coordinate system, 即只是在一个系统内部, 若要改变某样物件的位置或方向, 我们即利用 coordinate break 来作此物件的区域调整, 而不用重新改变所有的系统各部份。Coordinate break 就像是一个平面指向调整后的局部系统的方位。然而 coordinate break surface 绝不会显示出来。而它的 glass 项中显示为 "-" 代表不能键入, 而它的 surface type 型式一定跟它前面镜的 glass type 一致。现在我们来看看 layout, 不能选 2D(2D 只能看 rotational symmetric systems), 要用 3D 看, 叫出 layout 后, 按 ↑ ↓ 或 page down or up 可以看立体效果, 这个设计尚可再作改善, 首先入射光打到 fold mirror 背后的部份可以 vignettted, 这在实际的系统中是一个很重要的思量。在 STO 的前面插入一个 surface, 令这个 surface 的 thickness 为 900, 在 surface type 中的 Aperture Type 还为 "Circular Obscuration", 在 Max Radius 键入 40, 因为 fold mirror 的 semi-diameter 为 31, 如此才能遮蔽。Update 3D layout, 如看不到像 Figure E3-3 的图, 则在 3D layout 的 setting 项中改变 the first surface 和 the last surface 分别为 1 及 6 即可。

(回内容纲目)

● 习作四: Schmidt-Cassegrain 和 aspheric corrector

你将学到: 使用 polynomial aspheric surface, obscurations, apertures, solves, optimization, layouts, MTF plots.

本习作是完成 Schmidt-Cassegrain 及 polynomial aspheric corrector plate。这个设计是要在可见光谱中使用。我们要一个 10inches 的 aperture 和 10inches 的 back focus。开始设计之初，先把 primary corrector System, General, 在 aperture value 中键入 10, 同在一个 screen 把 unit "Millimeters" 改为 "Inches"。再来把 Wavelength 设为 3 个, 分别为 0.486, 0.587, 0.656, 0.587 定为 primary wavelength。你可以在 wavelength 的 screen 中按底部的 "select" 键, 即可完成所有动作。目前我们将使用 default 的 field angle value, 其值为 0。依序键入如 Zemax P.33 页的 starting prescription for schmidt cassegrain 的 LDE 表, 此时 the primary corrector 为 MIRROR 球镜片。你可以叫出 2D layout, 呈现出如 Figure E4-1 之图。现在我们在加入第二个 corrector, 并且决定 imagine plane 的位置。键入如 Zemax P.33 Intermediate prescription for schmidt cassegrain 的 LDE, 注意到 primary corrector 的 thickness 变为 -18, 比原先的 -30 小, 这是因为要放 second corrector 并考虑到其 size 大小的因素。在 surface4 的 radius 设定为 variable, 透过 optimization, Zemax 可以定下他的值。先看看他的 layout, 应如 Figure E4-2 所示。叫出 merit function, reset 后, 改变 "Rings" option 到 5。The rings option 决定光线的 sampling density, default value 为 3, 在此设计, 我们要求他为 5。执行 optimization, 用 Automatic 即可, 你会发现 merit function 的值为 1.3, 不是很理想。这是 residual RMS wave error 所致。跳出 merit function, 从 system 中选 Update All, 则 secondary corrector 的 radius 已变成 41.83。从 Analysis, fans, 中选 Optical Path, OPD plot 如 Figure E4-3 所示, 发现其为 defocus 且为 spherical, 大概约有 4 个 wave aberration 需要矫正。

现在切入另一个主题, 利用指定 polynomial aspheric coefficients 来作 aspheric correction。改变 surface 1 的 surface type 从 standard 改为 "Even Asphere", 按 OK 后跳出, 回到 surface 1 列中, 往右移直到 4th Order Term, 把此项设为变数, 依法炮制, 6th, 8th, 后再次执行 optimization。把 OPD plot update, 其图应如 Figure E4-4 所示, 你会发现 spherical aberration 已被大大地减少。小心一点的观察, 不同的三个波长其相对的 aberration 有不同的 spherical amount, 这就是 spherichromatism, 是下一个要矫正的目标。依据经验所得, 我们要用 axial color 来矫正 spherichromatism, 何谓 axial color balance 呢? 而实际上 spherichromatism 是在 first order axial color 中被忽略的 higher order 效应。而现在 first order axial color 并不存在, 如果 first order 存在的话, 代表其效应(首先 axial color 既是指轴而言, 他即表示 paraxial-optics, 即不同 color 在轴上的效应, 也就是 first order optics) 要远大于 higher order, 即 higher order 的 aberration 会被 balance 掉, 即 first order 会抢 higher order 的 aberration, 用 first order axial color 来消除 higher order 的 spherichromatism 这是在光学设计上常用的手法。

要怎么引进 axial color 呢? 我们改变 surface1 的 curvature 来达到 axial color 的效果。把曲面 1 的 radius 设为 variable, 执行 optimization, 再看看 update 后 OPD plot 图, 如图 E4-5 所示, 这就是我们所要设计的, 残余的像差, residual aberration 小于 1/20 波长, 这个良好结果, 可以让我们些微改变 field angle, 从 system, field 中, 把 field angle 的值设为 3 个, 分别是 0.0, 0.3, 0.5。现在 field angle 已改变, 等于 boundary condition 已改变, 所以你需要重定你的 merit function。把 merit function 的 "Rings" 改变为 "4" 后跳出执行 optimization, 则新的 OPD plot 应如图 E4-6 所示, 虽有不同 field angle, 但是所有的 aberrations 却可以接受。说明此设计还不错。

假想我们要用此望远镜来照相, 则这组望远镜的鉴别转换功效为何? 什么是鉴别转换功效 (Modulation Transfer Function) 呢? 这就是说, 若是发光物 Object 的鉴别率为 M_0 , 而经

过此望远镜后所得到的鉴别率是 M_i ，则 $MTF = M_i / M_0$ 即 MTF 愈大，代表此望远镜较不会降低原有的鉴别率，也就比较不会失真。而 MTF 的横轴为 spatial frequency in cycles per millimeter, spatial 为鉴别尺 (bar target) 明暗条纹中其分隔空间宽度之意，通常以 millimeter 为单位，而 frequency in cycles 即每 millimeter 有几组明暗条纹，所以可鉴别最小刻度，即反应该光波的频率。Modulation Transfer Function，即呈现如图 E4-7 所示之图，而 tangential & sagittal 对各种入射光 field angle 的 response 也一并显示。

对一个有经验的设计者而言，此设计所呈现的 MTF 为 circular pupil autocorrelation 的结果。这是我们尚未考虑 the secondary corrector 所带来遮蔽效应。既然 secondary corrector 放在 primary 的前面中心位置上，则入射光一定有部分被挡住，并且在 primary 上有个洞把成像的光放出去，此洞也需纳入考量，所以我们高估了我们的 performance。改良如下，回到 LDE，在曲面 3 的第一项中点两下，从 Aperture types 中选 Circular Aperture，在 Min Radius 中键入 1.7，即入射光离光轴的半径需大于 1.7 才可进入，此动作再处理 primary 上的洞，同时把 Max Radius 改为 6。再来处理 secondary corrector 的 obscuration，在 surface 3 的前面，插入一个 surface 这个 new surface 就变成了 surface 3，把其 thickness 改为 20，且 surface 2 的 thickness 改为 40，如此 $20+40=60$ 并不改变光从 BK7 后到 primary 的长度。调整 surface 3 的 Aperture type，设定为 Circular Obscuration。把 Max Radius 订为 2.5，按 OK 后跳出，同时设定 surface 3 的 semi-diameter 也是 2.5，update 后的 MTF ，你会发现 performance 已降低，特别是在 medial spatial frequencies 部分。

(回内容纲目)

● 习作五：multi-configuration laser beam expander

你将学到：使用 multi-configuration capability。

假设你需要设计一个在波长 $\lambda = 1.053 \mu$ 下操作的 laser beam expander，Input diameter 为 100mm，而 output diameter 为 20mm，且 Input 和 output 皆为 collimated。在此设计之前，我们必须遵守下列设计条件，

1. 只能使用 2 个镜片
2. 本设计在形式上必须是 Galilean (没有 internal focus)
3. 只有一个 aspheric surface 可以使用
4. 此光学系统必须在 $\lambda 328 \mu$ 下完成测试。

本设计任务不只是一要矫正 aberration 而已，而是在两个不同 wavelengths 的情况下都要做到。先谈谈条件 2 中什么是 Galilean 呢？Galilean 就是光线从入射到离开光学系统，在光学系统内部不能有 focus 现象，在本例中即 beams 在两个镜片之间不能有 focus。好在本系统不是同时在 2 个 wavelengths 下操作，所以在操作时我们可以变动某些 conjugates。现在开始设计，依据 Zemax P.4-18 页的 LDE 表中键入各 surface 的相关值。其中 surface 5 的 surface type 从 Standard 改为 Paraxial，这时在镜片后面的 focal length 项才会出现。注意到使用 paraxial lens 的目的是把 collimated light (平行光) 给 focus。同时把 surface 5 的 thickness 及 focal length 皆设为 25，entrance pupil 的 diameter 定为 100，wavelength 只选一个 1.053 microns 即可，记住不要在设第二个 wavelength。叫出 merit function，在第 1 列中把 operand type 改为 REAY 这表示 real ray Y 将用来作为一种 constraint，在本设计中，我们被要求 Input diameter 为 100

而 output diameter 为 20, 其比值为 $100:20=5:1$, 即入射 beam 被压缩了 5 倍, 在 srf# 中键入 5, 表示在 surface 中我们要控制他的 ray height, 而 Py 上则键入 1.00。把 target value 定为 10, 这个动作将会给我们一个 diameter collimated 为 20mm 的 output beam。为什么呢? 因为 Py 是 normalized 的 pupil coordinate, 即入射光的 semi-diameter 为 50., Py=1 即现在的入射光 is aimed to the top of the entrance pupil, 把 target value 定为 10, 就是输出光的 semi-diameter 为 10, 所以 $50:10=5:1$, 光被压缩了 5 倍, 达到我们的要求。semi-diameter 的值定为 10, 现在选 Tools, Update, 你会看到在 value column 上出现 50 的值, 这就是 entrance pupil radius 即表示 coordinates 是座落在一个单位圆 (unit circle) 上, 而其半径为 50, 当 Px=0, Py=1 即表示在 y 轴的 pupil 大小为 50, 而在 x 轴的则为 0。

从 edit menu bar 选 Tools, Default Merit Function, 按 Reset 后把 "Start At" field 的值改为 2, 这表示以后的 operands 会从第二列开始, 而不会影响已建立的 REAY operand。执行 optimization 后, 把 OPD plot 叫出来, 如图 E5-1 所示, 你会发现 performance 很差, 大约为 7 个 waves。

这个 aberration 主要来自 spherical aberration, 所以我们要把 surface 1 改为 a spheric, 把 surface 1 列中的 conic 设为 variable, 再次执行 optimization, 你会看到较好的 OPD plot。现在把所有的 variable 都去掉, 然后将此 field 存档, 因为你已完成 wavelength 在 1.053μ 下的 beam expander 设计。但是 wavelength 在 0.6328μ 的情况怎么办呢? 我们进入此习作的另一个主题, 也就是 multi-configuration 可以在同一系统中同时设定不同的 configuration, 以适应不同的工作环境或要求, 先前我们已完成了 wavelength 为 1.053μ 的 configuration, 把他看做 configuration 1, 而 wavelength 0.6328μ 为 configuration 2。

把 wavelength 从 1.053 改为 0.6328 后看看 OPD plot, 出现非常差的 performance, 这是因为 glass dispersion 的缘故。我们调整 lens spacing 来消除此 defocus 把 surface 2 的 thickness 设为 variable, 执行 optimization 后, update OPD plot, 此时的 aberration 大约为一个 wave, 接下来消掉 surface 2 thickness 的 variable。现在我们来使用 Zemax 的 multi-configuration capability 功能, 从 main menu 上选 Editors, 后 Multi-configuration, 再选其中的 Edit, Insert Config, 如此我们就可以加入一个新的 configuration, 在第一列的第一项中按两下, 选 "wave", 同时在 "Wavelength#" 中选为 1, 这表示在不同的 configuration, 我们使用不同的 wavelengths。在 Config 1 下键入 1.053, Config 2 下键入 0.6328, 在插入一个新的列于此列的第一项中按两下, 选 THIC 为一个 operand type, 这会让我们在各别的 configuration 中定义不同的 thickness, 从 "surface" list 中选 2 后按 OK。在 Config 1 下键入 250, Config 2 也键入 250, 不过在 surface 中选 2 即表示在 LDE 中 surface 2 的 thickness 是当作 multi-configuration 的一项 operand value, 把 Config 2 下 surface 2 的 thickness 设为 variable。回到 merit function editor, 选 Tools, Default Merit Function, 把 "StartAt" 的值改为 1, 使 default merit function 会从第一列开始考虑。现在先前设定的 REAY constraint 条件必须加到此新的 multi-config merit function, 在 merit function 的第一列中, 有一个 CONFoperand 且在 "Cfg#" 项中定为 1, 表示现在 configuration 1 是 active。在此列之下尚有三个 OPDXoperands, 于 CONF 和第一个 OPDX 之间插入一个新列, 把其 operand type 改为 "REAY", "Srf#" 键入 5。表示我们要控制的 ray height 是对 surface 5 而言, Py 键入 1.00 target value 设为 10。如同先前的 file 让输出 beam 的 diameter 为 20mm。在 CONF 1 的要求接设定完毕, 在 CONF 2 则不设任何 operand, 因为我们不可能在两种 wavelengths 操作下要求 exact 5:1 的 beam。回到 LED, 把 surface 1, 2, 4 的 curvatures 及 surface 1 的 conic 皆设为 variable, 执行 optimization (现在有 5 个 variable

为 active, 3 个 curvatures, 1 个 conic, 1 个 multi-config thickness)。叫出 update 的 OPD plot, 你可以在 mult-configuration editor 上在“Config 1”或“Config 2”上按两下, 则 OPD plot 会显示其对应的 configuration, 或者你可用 Ctrl-A 的 hot key, 在不同的 configuration 间作变换, 你会发现两者的 performance 都很好, 表示我们所设计的系统在 wavelength 1.053 或 0.6328 μ 的 laser 之下皆可以工作。

(回内容纲目)

● 习作六: fold mirrors 和 coordinate breaks

你将学到: 瞭解 coordinate breaks, sign conventions 在调整倾斜度, 或改变系统中心的作用和如何装置 fold mirrors 等, 本习作的大部分技巧在“Add Fold Mirror”工具中可自动执行, 然而瞭解实际的操作内容和细节, 才是本习作的目的。

在习作 3 时或许你已学会如何设计 Newtonian 望远镜, 其中已经有 coordinate breaks 的操作, 以及光在经过 mirror 反射后 thickness 虚设定为负值, 和 coordinate breaks 需伴随著一对使用, 而把要的 fold mirror 如三明治般地夹在其中。本习作将教你如何在简单的 converging beam 中 manually 加入 fold mirrors, 而不使用 Tools 中的“Add Fold Mirror”功能。

叫出 LDE, 把 STO 的 surface type 改为 paraxial, thickness 定为 100, 这时对 paraxial lens 的 default focal length 值, 然后从 System, General, 中把 aperture 设为 20, 即产生一个 F/5 的 lens。完毕后看看 3D layout, 一个简单的 paraxial lens 所造成 converging beam 的光学系统已完成。假设我们要把输出的 converging beam 导向上, 怎么作呢? 那就是加入一个 fold mirror, 先假定此 fold mirror 为 45° oriented 且具 paraxial lens 为 30mm。总共需要 3 个镜片。一个为 coordinate break 把 coordinate system 转 45°, 然后一个 mirror 来反射光线, 最后再一个 coordinate break 把反射后的 beam 给转 45°。这是很重要的一点, 共要 3 个 surface 来装置一个 fold mirror。coordinate breaks 本身没什么作用, 只是把入射光和输出光作同样的倾斜或改变中心座标的动作而已。在 imaging surface 前面出入 3 个 lens, 把 surface 1 的 thickness 定为 30, 在 surface 3 的 glass fold mirror 尚未 titled, 所以系统会在 paraxial lens 的左边 40mm 处 focus。更改 surface 2 及 4 的 surface type 为 Coordinate Brek, 回到 LDE 往右一, 在 surface 4 的第 3 个 parameter column 中期 heading 上头标示为”Title About X”。在此项中按两下, 选”Pick Up”, 且设定”From Surface”为 2, ”Scale Factor”为 1.0, 这代表 surface 4 的 coordinate break 动作会跟 surface 2 的一样。移由标到 surface 2 的”title about x”项中, 键入 45, Update layout 你会看到如 Figure E6-1 的图。注意到 coordinate break 的 thickness 为 0, 表示 mirror 和 coordinate break surface 是重合的。应该注意的是, mirror 本身并没有转, 转的是入射前合入射后的座标系统, 在反射后除了转 45° 外, 并且移了 -70units 去 focus, 所有的 tilt 或 decenter 动作总是在光线跑, 即 thickness 之前完成。现在再装第二个 fold mirror, 同样在 imagine surface 前面插入 3 个 surface, 把 surface 4 的 thickness 从 -70 改为 -30, 在 surface 5 的 tilt about x 项键入 -45, 目的是在把光的进行方向还原到平行于原始入射方向, 而 surface 7 的 tilt about x 项一样选择 pick up from surface 5 且 scale factor 定为 1。

Update 3D layout, 则呈现如 Figure E6-2 的图, 如我们期待的, +45 和 -45 互相抵消, 输出光平行于入射光, 又要改变两组的 coordinate breaks 的参数, 只要改变 surface 2 及 5 即可。因为 surface 4 及 7 会各别依随他们变动而变动。

(回内容纲目)

● 习作七：使用 Extra Data Editor, Optimization with Binary

Surfaces

或许你不会相信，会有“achromatic singlet”这样的东西。当然，mirror 是一个 achromatic singlet，姑且不论之，去设计一个矫正到 first-order chromatic aberration 混合 refractive/diffractive 成分是不可能的。其中的技巧就是使用一个传统 refractive singlet，然后将其中的一面蚀刻成一个 diffractive surface。此 singlet 造成很大的 focusing power，而 the weak diffractive component 则提供足够的 dispersion 来补偿 glass 的 dispersion。让我们回顾一些概念，一个 focal length f 的 singlet 其 optical power 为 $\phi = f^{-1}$ ，在 $\lambda F - \lambda C$ 的波长范围下，power 的变异部分可由 singlet 其 glass 的 Abbe number V 来描述，其中 λF 及 λC 为 hydrogen 的 F 及 C line 的 wavelength 依序为 $0.4861 \mu m$ 和 $0.6563 \mu m$ 。故

$$\Delta \phi = \phi / V$$

在大部分的 glasses 种类中，他们的 dispersion 都很小，如 BK7 来说，其 V 值为 64.2。而 $\Delta \phi$ 大约为整体的 2%。

而 Diffractive optics 则直接使用 phase of wavefront 操作来增加光数的 optical power。对一个具有 quadratic phase profile 的 diffractive surface，其 phase 为

$$\psi = Ar^2$$

A 为每平方单位长度的弧度量，而 r 为 radial coordinate。如此的 diffractive surface，他的 power 为

$$\phi = \lambda A / \pi$$

和他所承受的波长呈线性相关。在同样的波长范围下，refractive singlet 的 power 变异为 2%，而 diffractive optic power 则几乎为 40%，此外，dispersion 的正负号可由 A 的正负号来决定。这有什么好处呢？如果我们在 refractive 部分增加一些 positive power，同时可由在 diffractive 部分增加一些 negative power 来达到补偿的效果。所增的 power 量可以从“Standard”改为“Binary 2”。然后在 IMA 前面加入一个新的 surface，即插入 surface 2，其 thickness 设为 100。STO 的 thickness 设为 10，glass 选为 BK7，从 System, General 中 Aperture Value 定为 20。Wavelengths 选 0.486, 0.587 及 0.656，选 0.587 定为 primary。首先我们看一个 convex-plano singlet 的 performance，把 surface 1 的 radius 设为 variable，且从 Merit Function Editor 的 tools 中使用 Default Merit Function。子行 Optimization，叫出 OPD plot，你会发现其 aberration 约为 8 个 waves。除了 axial color 主宰此设计外，spherical aberration 和 default 也相当可观。

现在改良此设计，从 Editors, Extra Data 中在“Max Term”项上键入 1 和“Norm Aper”上键入 10，而“Coeff on P^2 ”此项则设为变数。然后执行 Optimization，其中有两项变数，分别是 surface 1 的 radius 及 diffractive power。Update OPD plot 则 maximum aberration 已经降至约一个 wave，造成 aberration 的主要原因只剩下 secondary spectrum 及 spherical aberration。我们利用 higher order term 的技巧来矫正他，回到 Extra Data Editor，把“MaxTerm #”改为 2，且把 fourth order term 项为 variable，再次执行 optimization。叫出 updated 后的 OPD plot，你会发现 wavefront aberration 已大大降至 1 个 wave 以下。

(回内容纲目)