

应用光学

谭峭峰

tanqf@mail.tsinghua.edu.cn

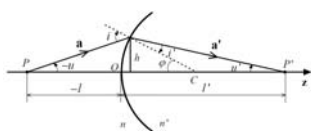
清华大学 精密仪器系 光电工程研究所

第六章

光线追迹与成像质量

6.1 光线追迹

近轴光线追迹:



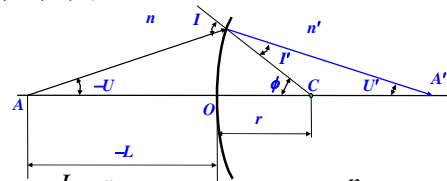
已知物方参数 n, l, u
像方参数 n'
近轴球面半径 r

$$\begin{cases} i = \left(\frac{l}{r} - 1\right)u \\ i' = \frac{rni}{n'} \\ u' = u + i - i' \\ l' = r\left(1 + \frac{i'}{u'}\right) \end{cases}$$

理想光学系统光线追迹: 正切算法

实际光学系统:

$$\sin \theta = \theta - \frac{1}{3!}\theta^3 + \frac{1}{5!}\theta^5 - \frac{1}{7!}\theta^7 + \dots$$



$$\begin{aligned} \sin I &= \frac{L-r}{r} \sin U & \sin I' &= \frac{n}{n'} \sin I \\ U' &= U + I - I' & L' &= r\left(1 + \frac{\sin I'}{\sin U'}\right) \end{aligned}$$

- (1) 像差: 实际像与理想像之间的差异。
- (2) 产生像差的原因: 成像光路表达式中忽略级数展开式中的高次项。

§ 6.1.1 任意界面的光程模型

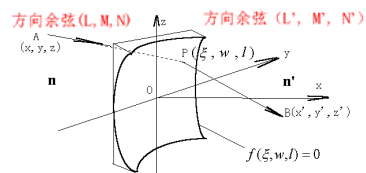
统一的模型能够追迹不同原理(折射和衍射)的成像光线?

费马原理: 一条实际光线在任意给定点P和点Q之间的光程是一个极值, 即

$$\delta \int_P^Q n(x, y, z) ds = 0$$

ds 表示P点到Q点之间曲线上的无限小弧长。

取极值, 可以是极大值, 也可以是极小值。



任意界面光线追迹示意图

光线APB的光程: $F = n \langle AP \rangle + n' \langle PB \rangle + m \frac{\lambda}{\lambda_d} \Phi_{DOE}$

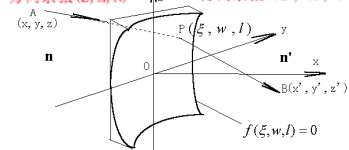
费马原理: $\frac{\partial F}{\partial w} = 0, \quad \frac{\partial F}{\partial l} = 0$

设任意界面的面方程: $f(\xi, w, l) = 0$

其上任意点P(ξ, ω, l)处的相位函数为 $\Phi_{DOE}(w, l)$

$$\Phi_{DOE}(w, l) = \sum_{i=0}^{\infty} \sum_{j=0}^{\infty} C_{ij} w^i l^j \quad (C_{00} = 0)$$

方向余弦(L, M, N) 方向余弦(L', M', N')



任意界面光线追迹示意图

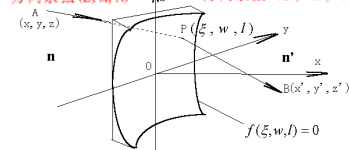
$$L = -\frac{x-\xi}{\langle AP \rangle}, \quad M = -\frac{y-w}{\langle AP \rangle}, \quad N = -\frac{z-l}{\langle AP \rangle},$$

$$L' = \frac{x'-\xi}{\langle PB \rangle}, \quad M' = \frac{y'-w}{\langle PB \rangle}, \quad N' = \frac{z'-l}{\langle PB \rangle},$$

$$\langle AP \rangle = \sqrt{(x-\xi)^2 + (y-w)^2 + (z-l)^2},$$

$$\langle PB \rangle = \sqrt{(x'-\xi)^2 + (y'-w)^2 + (z'-l)^2}.$$

方向余弦(L, M, N) 方向余弦(L', M', N')



任意界面光线追迹示意图

界面面形方程为 $f(\xi, w, l) = 0 \longrightarrow \xi = \xi(w, l)$

P点处法向量的方向余弦 $(\cos \alpha, \cos \beta, \cos \gamma)$

$$\cos \alpha = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{\partial \xi}{\partial w}\right)^2 + \left(\frac{\partial \xi}{\partial l}\right)^2}}, \quad \cos \beta = \frac{-\frac{\partial \xi}{\partial w}}{\sqrt{1 + \left(\frac{\partial \xi}{\partial w}\right)^2 + \left(\frac{\partial \xi}{\partial l}\right)^2}},$$

$$\cos \gamma = \frac{-\frac{\partial \xi}{\partial l}}{\sqrt{1 + \left(\frac{\partial \xi}{\partial w}\right)^2 + \left(\frac{\partial \xi}{\partial l}\right)^2}}.$$

色散系数μ和偏折系数T:

$$\mu = \frac{m\lambda}{\lambda_d}, \quad T = \frac{n' L' - n L}{\cos \alpha}$$

$$\begin{cases} n' L' = n L + T \cos \alpha \\ n' M' = n M + T \cos \beta + \mu \frac{\partial \Phi_{DOE}}{\partial w} \\ n' N' = n N + T \cos \gamma + \mu \frac{\partial \Phi_{DOE}}{\partial l} \end{cases}$$

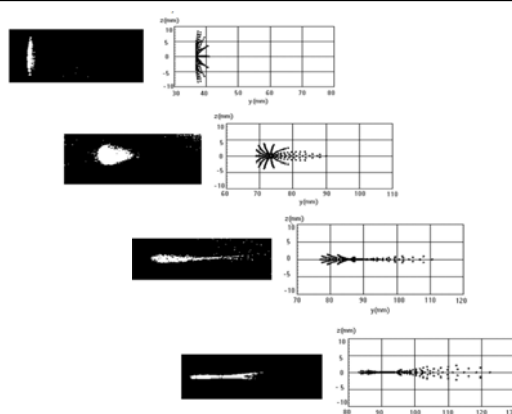


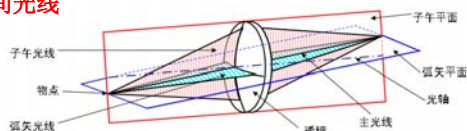
图6-1 离轴全息透镜的光线追迹

§ 6.1.2 实际系统的光线追迹

已知球面半径r, 物方参数n、L、U, 像方参数n'

计算成像位置与质量

轴上点子午面内的近轴光线和实际光线
轴外点沿主光线的细光束
空间光线



■子午面(meridional): 物点(或主光线, 即通过孔径中心的光线)所在并包含光轴的平面。对于轴对称系统的轴上物点, 它有无限多个子午面。对于一给定的轴外物点, 仅有一个子午面。

■弧矢面(sagittal): 包含主光线并且垂直于子午面的平面。

子午面内的近轴光线: 基点, 基面, 理想成像位置与放大率, 入瞳出瞳大小位置等。

第一近轴光线: 轴上物点, 最大孔径角

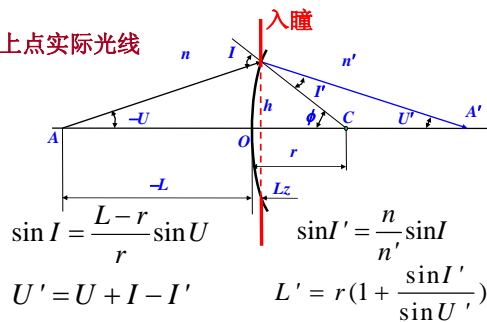
第二近轴光线: 轴外物点(最大视场), 过入瞳中心

实际光线: 实际成像位置与放大率, 与孔径、视场有关。

沿主光线的细光束: 子午面与弧矢面成像位置。

空间光线: 全面了解成像质量。

轴上点实际光线



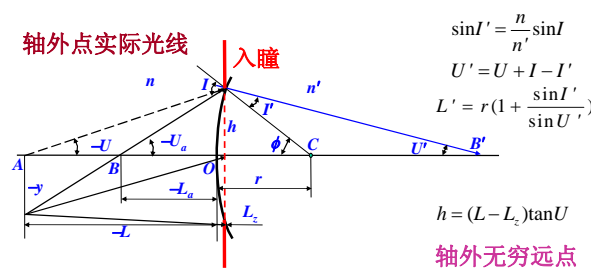
$$\sin I = \frac{L-r}{r} \sin U \quad \sin I' = \frac{n}{n'} \sin I$$

$$U' = U + I - I' \quad L' = r \left(1 + \frac{\sin I'}{\sin U'} \right)$$

轴上无穷远点: $\sin I = h/r$

转面公式: $L_k = L'_{k-1} - d_{k-1}, U_k = U'_{k-1}$

轴外点实际光线



$$\sin I' = \frac{n}{n'} \sin I$$

$$U' = U + I - I'$$

$$L' = r \left(1 + \frac{\sin I'}{\sin U'} \right)$$

$$h = (L - L_c) \tan U$$

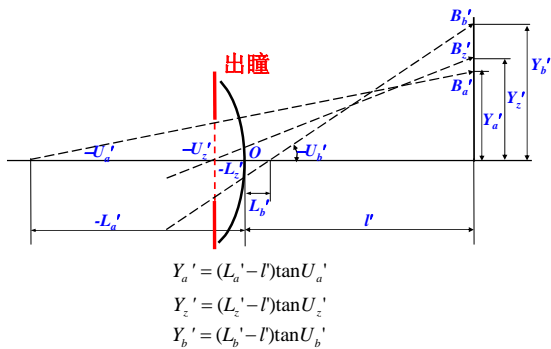
轴外无穷远点

上光线: $\tan U_a = \frac{y-h}{L_c-L}, L_a = L_c + \frac{h}{\tan U_a}$

主光线: U, L_c

下光线: $\tan U_b = \frac{y+h}{L_c-L}, L_b = L_c - \frac{h}{\tan U_b}$

轴外点实际光线与理想像面的交点(不同光线的像高)



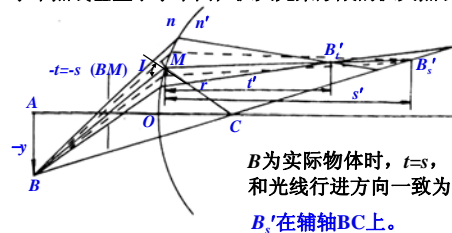
$$Y'_a = (L'_a - l') \tan U'_a$$

$$Y'_z = (L'_z - l') \tan U'_z$$

$$Y'_b = (L'_b - l') \tan U'_b$$

沿主光线的细光束

实际光学系统轴上点发出的细光束因光束轴和光学系统的光轴重合, 折射后依然保持同心。轴外点发出的细光束与投射点的法线不重合, 折射后不是同心光束, 是像散光束, 在子午面与弧矢面形成各自像点, 为相互垂直的两条短线(焦线), 子午光束形成的子午焦线垂直于子午面; 弧矢光束形成的弧矢焦线垂直于弧矢面。



B为实际物体时, $t=s$, 以M为原点, 和光线行进方向一致为正, 反之为负。
 B'_s 在辅轴BC上。

杨氏公式:

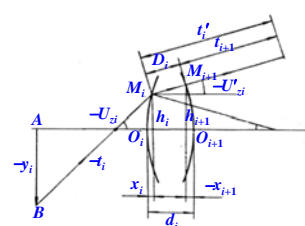
$$\frac{n' \cos^2 I'}{t'} - \frac{n \cos^2 I}{t} = \frac{n' \cos I' - n \cos I}{r}$$

$$\frac{n'}{s'} - \frac{n}{s} = \frac{n' \cos I' - n \cos I}{r}$$

需进行主光线的光线追迹, 求入射角和折射角。

转面公式:

由一个折射面向下一个折射面过渡时, 必须沿主光线进行计算。



$$t_{i+1} = t_i' - D_i \quad U_{i+1} = U'_{ci}$$

$$s_{i+1} = s_i' - D_i$$

$$D_i = \frac{h_i - h_{i+1}}{\sin U'_{ci}}$$

$$D_i = \frac{d_i - x_i + x_{i+1}}{\cos U'_{ci}}$$

空间光线

$$\begin{cases} n' L' = nL + T \cos \alpha \\ n' M' = nM + T \cos \beta \\ n' N' = nN + T \cos \gamma \end{cases}$$

入射光线方向余弦(L, M, N)，折射光线方向余弦(L', M', N')

偏折系数T: $T = \frac{n' L' - nL}{\cos \alpha}$

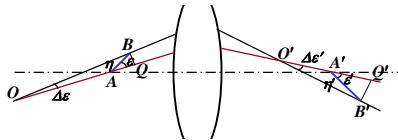
入射光线与曲面交点的法线: $(\cos \alpha, \cos \beta, \cos \gamma)$

6.2 像差

理想光学系统：实际光学系统只在近轴区才具有理想光学系统的性质，即只有当孔径和视场很小的情况下才能成完善像。

- 除平面反射镜外，其他的光学系统都不能成完善像，即系统存在像差。像差是指实际光学系统的成像与理想光学系统成像之间的差异。
- 实践和理论都证明完全消除像差是不可能的。
- 人眼和其他光接收器本身具有一定的缺陷，没有必要把光学系统的像差完全消除。只要把影响像质的几个主要像差减小到某种容限范围内，即接收器不能察觉时，就可认为光学系统得到了满意的成像效果。

光学成像中对临近点成完善像的条件是余弦定律。

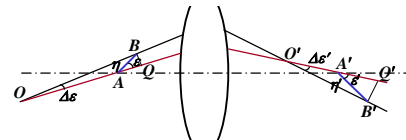


光轴上点A成完善像于A'，B为A点临近点，成完善像于B'。过A引一光线OA，OA与AB夹角 ϵ 。过B引一光线OB，OB与AB夹角 $\epsilon + \Delta\epsilon$ 。像方类似。

费马原理: $[OAO'] = [OBO']$

$$nOA + [AA'] - n'O'A' = nOB + [BB'] - n'O'B'$$

$$n(OB - OA) - n'(O'B' - O'A') = [AA'] - [BB']$$



$$n(OB - OA) - n'(O'B' - O'A') = [AA'] - [BB']$$

$$n\eta \cos \epsilon - n'\eta' \cos \epsilon' = [AA'] - [BB']$$

满足余弦定律时， ϵ 可为任意值，光线的孔径角不受限制，即两邻近可以以任意宽光束成完善像。

垂轴平面内对临近点成完善像的条件是正弦条件：

$$n y \sin U = n' y' \sin U'$$

轴向邻近点完善成像的条件是赫歇尔条件：

$$n y \sin \frac{U}{2} = n' y' \sin \frac{U'}{2}$$

正弦条件和赫歇尔条件不能同时满足（除非 $U=U'=0$ ），如果对垂轴平面成完善像，则对其沿轴向的物平面就不能成完善像。不存在对一空间成完善像的光学系统。

§ 6.2.1 像差分类

- 基于几何光学，利用实际光线的空间坐标参量相对理想坐标参量的偏离作为像差的度量，称为“几何像差”或“光线像差”。能反映实际成像光线束的空间结构特性。
- 基于波动光学，利用实际波面相对标准参考波面的偏离作为度量的像差，称为“波像差”。可反映实际光学系统的相位变换特性。

几何像差和波像差两者具有内在联系。

根据成像的条件和特性，把像差分为两大类：

• 单色光成像时系统产生的像差，称为**单色像差**，可用几何像差和波像差表示，其中单色几何像差包括**球差、彗差、像散、场曲和畸变**。

• 复色光成像时，由于介质的色散性而引起的不同色光之间成像的差别，称为**色差**。色差可表示为几何色差和波色差，其中几何色差包括**位置色差和倍率色差**。

$$f' = \frac{r_1 r_2}{(n-1)(r_2 - r_1)}$$

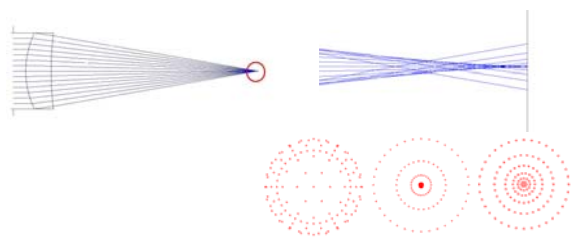
§ 6.2.2 像差计算的谱线选择

• 光学系统校正像差的谱线选择，主要决定于使用条件和光能接收器的特性。光学系统要**校正单色像差**的波长和**校正色差**的波长主要取决于光接收器的光谱响应性能，但往往要受光源和光学材料的限制。设计时应使接收器、光源和光学材料三者的性能匹配好，即尽可能使接收器响应最灵敏的谱线是光源辐射最强的谱线，也就是光学材料透过率最好的谱线。

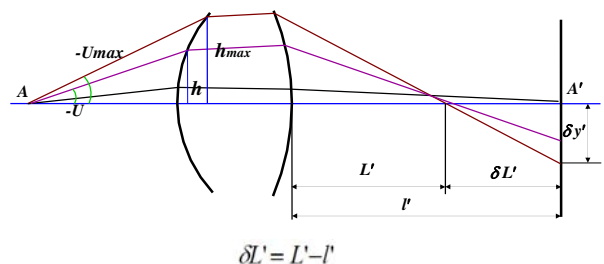
• 校正像差时谱线选择的原则是：**在光学系统工作的波段范围内，光学系统对接收器的光谱响应灵敏度曲线与光源辐射光谱强度分布曲线之乘积最大值所对应的波长校正单色像差，对该波段内靠近两端的二种波长校正色差。**

§ 6.2.3 单色像差

球差：由**光轴上某一物点**发出的**单色光束**，经光学系统后，不同孔径角的光线交光轴于不同位置，从而使轴上像点被一弥散光斑所代替，光学系统对该物点成像所存在的这种缺陷为球差。



对应孔径角 U_{\max} 入射光线的高度 h_{\max} 被称为**全孔径(边光球差)**；对应孔径角 U 入射光线的高度 h ；若 $h/h_{\max}=0.7$ ，则称为**0.7孔径或0.7带光(带光球差)**。

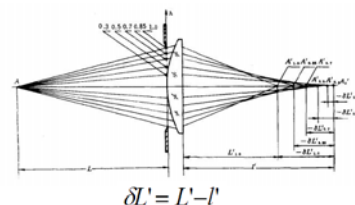


球差是轴上点唯一的单色像差

可在沿轴方向和垂轴方向来度量分别称为**轴向球差**和**垂轴球差**。

轴向球差又称为**纵向球差**，是沿光轴方向度量的球差，用符号 $\delta L'$ 表示。

垂轴球差是过近轴光线像点 A' 的垂轴平面内度量的球差，用符号 $\delta y'$ 表示，表示由轴向球差引起的**弥散圆的半径**： $\delta y' = \delta L' \tan U'$



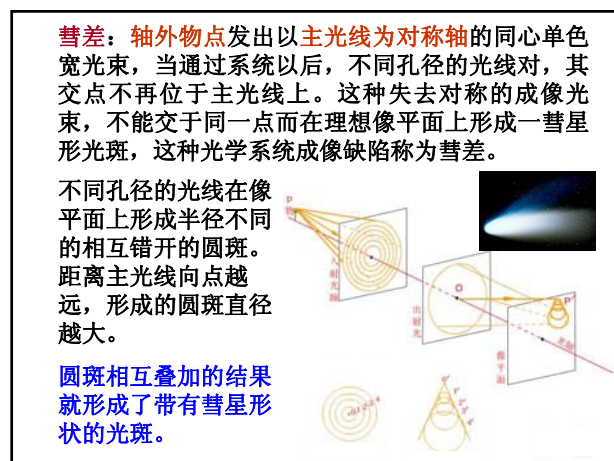
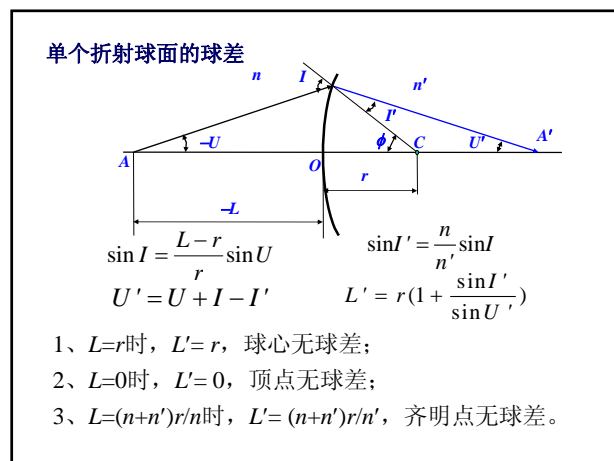
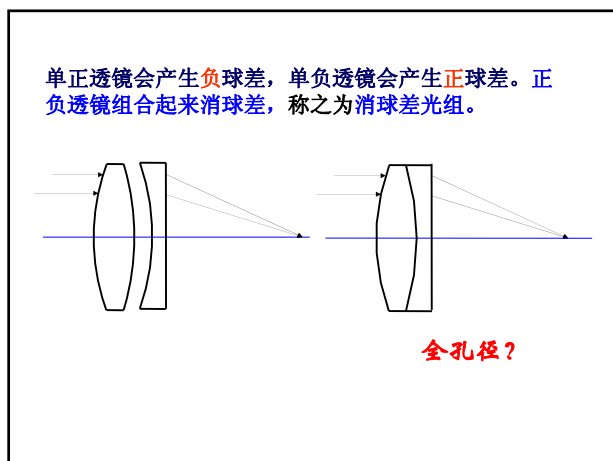
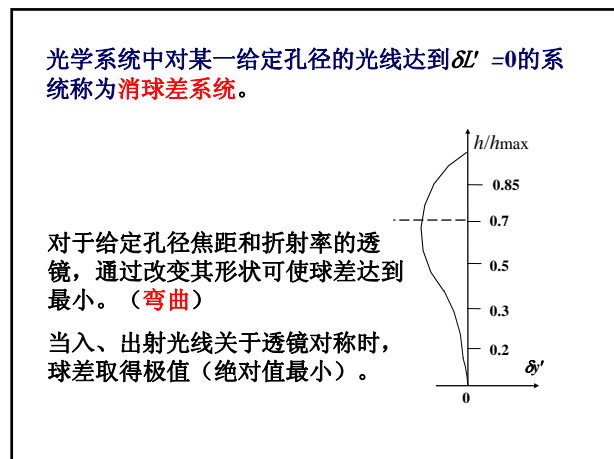
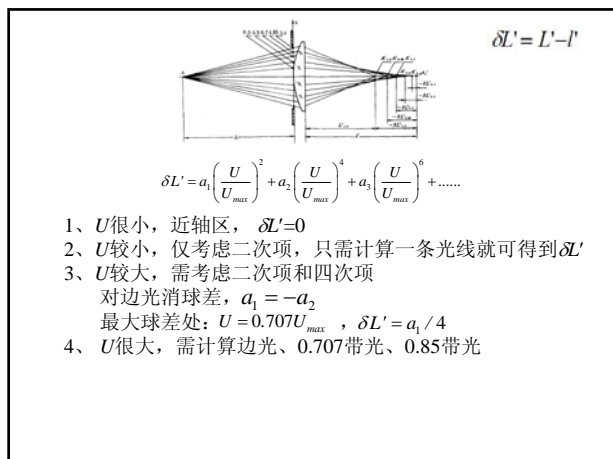
孔径角越大，球差值越大(单透镜)。

$$\delta L' = a_1 \left(\frac{U}{U_{\max}} \right)^2 + a_2 \left(\frac{U}{U_{\max}} \right)^4 + a_3 \left(\frac{U}{U_{\max}} \right)^6 + \dots$$

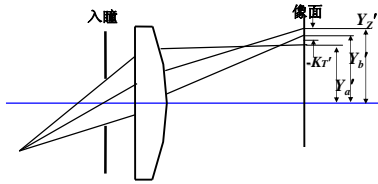
初级球差 **高级球差**

$$\delta L' = A_1 \left(\frac{h}{h_{\max}} \right)^2 + A_2 \left(\frac{h}{h_{\max}} \right)^4 + A_3 \left(\frac{h}{h_{\max}} \right)^6 + \dots$$

初级球差 **高级球差**



彗差通常用子午面和弧矢面对称于主光线的各对光线，经系统后的交点相对于主光线的偏离来度量，分别称为子午彗差 K_T' 和弧矢彗差 K_S' 。



子午彗差值是以轴外点子午光束上、下光线在高斯像面上交点高度的平均值与主光线在高斯像面上交点高度之差表示：

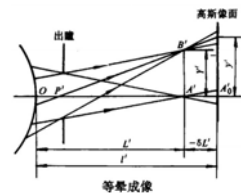
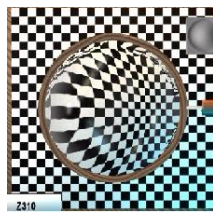
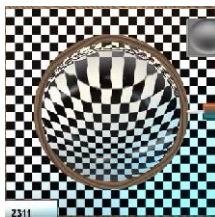
$$K_T' = \frac{1}{2} (Y_a' + Y_b') - Y_c'$$

彗星像斑的尖端指向视场中心的称为正彗差。

彗星像斑的尖端指向视场边缘的称为负彗差。

彗差没有对称轴只能垂直度量，是垂轴像差的一种。影响像的清晰度，降低成像质量。

彗差的大小与光束宽度、物体的大小、光阑位置、光组内部结构(折射率、曲率、孔径)有关。



轴上点和近轴点具有相同的成像缺陷，称为等晕成像。

正弦差描述对等晕条件的偏离： $SC' \approx \frac{K_S'}{y'}$

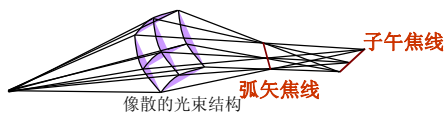
弧矢彗差 K_S'

$SC' = 0$ 等晕成像； $\delta L' = 0$ 正弦条件。

无球差也无正弦差，称为不晕成像。

正弦差适用于小视场系统（显微镜物镜），彗差适用于任意系统。

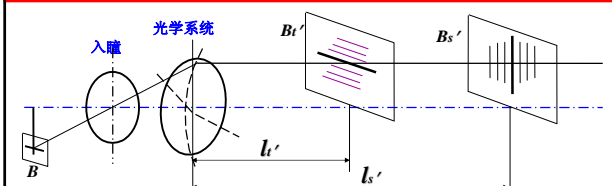
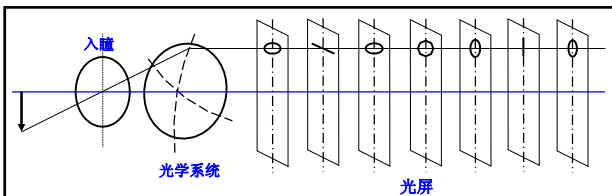
像散：当光学系统对非近轴的物点以元(细)光束成像时，若像点被分离着的子午焦线和弧矢焦线所代替，则称系统对给定物点的成像存在像散。



杨氏公式：

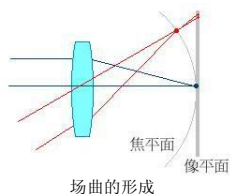
$$\frac{n' \cos^2 I'}{t'} - \frac{n \cos^2 I}{t} = \frac{n' \cos I' - n \cos I}{r}$$

$$\frac{n'}{s'} - \frac{n}{s} = \frac{n' \cos I' - n \cos I}{r}$$

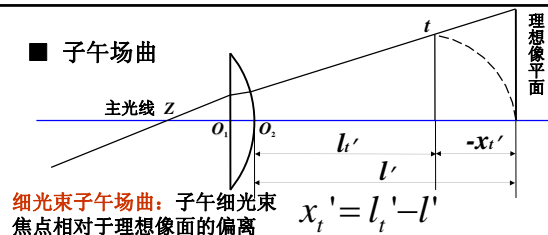


子午焦线和弧矢焦线沿光轴方向的距离表示像散大小，用 X_{ts}' 表示： $X_{ts}' = l_t' - l_s'$ 。

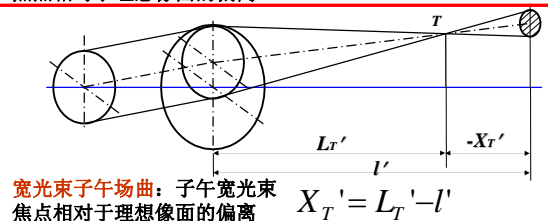
场曲：在消像散的光学系统中，若成清晰像的最佳像面仍不为平面，则称该系统存在像场弯曲，即**场曲**。场曲需要以子午场曲和弧矢场曲来表征，用**细光束**和**宽光束**来度量。



■ 子午场曲

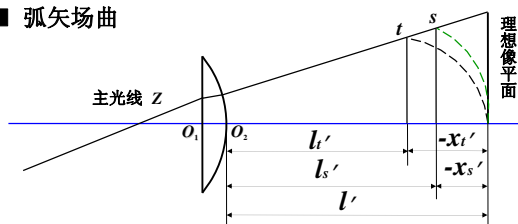


细光束子午场曲：子午细光束焦点相对于理想像面的偏离 $x_t' = l_t' - l'$

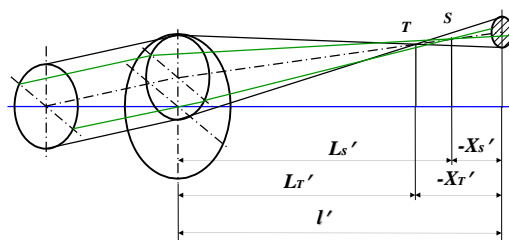


宽光束子午场曲：子午宽光束焦点相对于理想像面的偏离 $X_T' = L_T' - l'$

■ 弧矢场曲



细光束弧矢场曲：弧矢细光束焦点相对于理想像面的偏离 $x_s' = l_s' - l'$



宽光束弧矢场曲：弧矢宽光束焦点相对于理想像面的偏离 $X_S' = L_S' - l'$

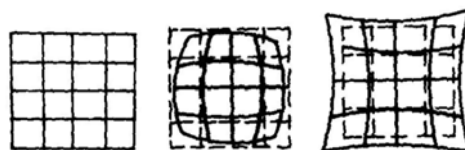
细光束子午场曲与宽光束子午场曲之差为轴外点子午球差；细光束弧矢场曲与宽光束弧矢场曲之差为轴外点弧矢球差。

存在场曲时，不能使一个较大的平面物体的各点同时在**同一垂轴平面像面**上成清晰像。若中心清晰，则边缘模糊；若边缘清晰，则中心模糊。

像散和场曲是两个不同的概念，两者既有联系，又有区别。**像散的存在，必然引起像面弯曲**；但即便**像散校正为零**，实际像面也不是平面，**存在场曲(匹兹万场曲)**。

畸变：球差、彗差、像散、场曲的共同特点，是**像点被弥散斑所代替，破坏了成像的清晰程度**。**不影响成像的清晰程度**，而仅影响像与物的几何相似性，或者说仅影响像的几何形状，这种像差称为**畸变**。

光学系统对共轭面上不同高度的物体有不同的垂轴放大率所致，即 β 不是常数，而是物高的函数（或视场角的函数）。



桶形畸变

枕形畸变

畸变的存在使轴外直线成为曲线像。**枕形畸变**（正畸变）：垂轴放大率随视场角的增大而增大的畸变；**桶形畸变**（负畸变）：垂轴放大率随视场角的增大而减小的畸变。

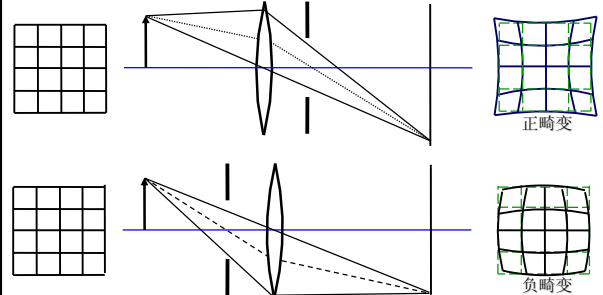
$$\text{相对畸变: } q = \frac{\bar{\beta} - \beta}{\beta} \times 100\% \quad \begin{array}{l} \bar{\beta}: \text{实际放大率} \\ \beta: \text{理想放大率} \end{array}$$

可以用实际主光线与高斯像面的交点高度 Y_z' 与理想像高 y' 之比表示

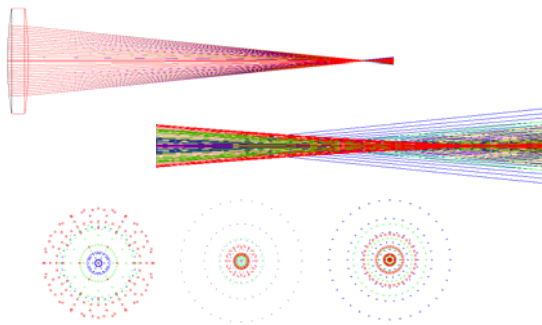
$$q = \frac{Y_z' - y'}{y'} \times 100\%$$

线畸变: $\delta y_z = Y_z' - y'$ 畸变与其它像差不同，仅由主光线的光路决定。

单个薄透镜或薄透镜组的主面与孔径光阑重合时不产生畸变，因为主光线通过透镜的主点并沿理想方向出射。当光阑位于单透镜组之前或之后即产生畸变，符号相反。



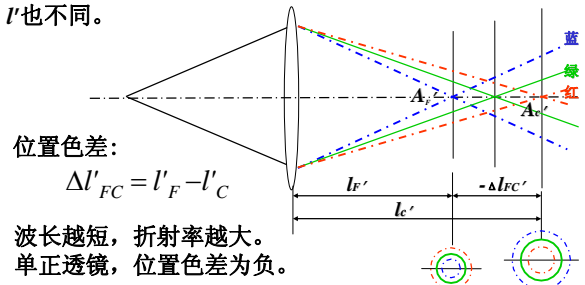
色差：各种波长光线之间成像位置和成像大小的差异称为色差。**位置色差**和**倍率色差**。



■ 位置色差（轴向色差、纵向色差）

$$f' = \frac{r_1 r_2}{(n-1)(r_2 - r_1)}$$

一定物距 l 成像时，各色光的焦距不同，所得到的像距 l' 也不同。



$\Delta l'_{FC} < 0$ 色差校正不足

$\Delta l'_{FC} > 0$ 色差校正过度

$\Delta l'_{FC} = 0$ 对F光(蓝)和C光(红)消色差

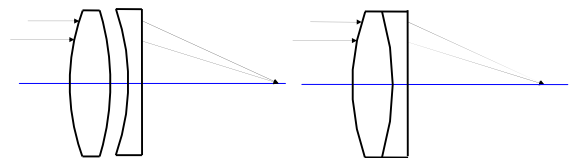
位置色差不同于球差，近轴区就会产生。

细光束成像也不能获得白光的清晰像。

只能对一个孔径进行色差校正，一般选**0.7孔径**

$$\Delta l'_{0.7FC} = l'_{0.7F} - l'_{0.7C} = 0$$

正负透镜组合起来消球差，称之为消球差光组。



阿贝(Abbe)数V:
$$V = \frac{n_d - 1}{n_F - n_C}$$

d线，黄色氦光，波长587.5618nm

C线，红色氦光，波长656.2725nm

F线，蓝色氦光，波长486.1327nm

$$f' = \frac{r_1 r_2}{(n-1)(r_2 - r_1)}$$

一定物距 l 成像时，各色光的焦距不同，所得到的像距 l' 也不同。

对于由密接双透镜构成的合成焦距为 f (d线)的光学系统，设材料阿贝数分别为 V_1 和 V_2 ，焦距分别为 f_1 (d线)和 f_2 (d线)，若欲使此系统满足消色差要求，应满足：

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2}$$

$$\frac{f_2}{f_1} = -\frac{V_1}{V_2}$$

■ 倍率色差（纵向色差）

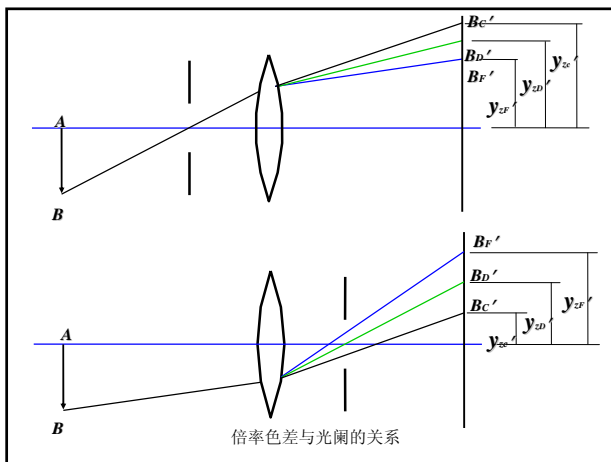
$$\beta = -\frac{x'}{f'}$$

不同色光的焦距不等，放大率不等，不同的像高：倍率色差

像的边缘呈现彩色，影响成像清晰度。

倍率色差以两种色光的主光线在高斯像面上的交点高度之差来度量。

$$\Delta y'_{FC} = y'_{ZF} - y'_{ZC}$$

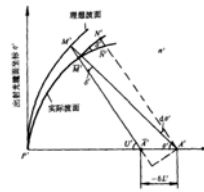


波像差：实际波面与理想波面的偏离。

计算光程来计算波像差。

马吕斯定律：入射波面上各点经任意多次反射和折射后出射波面上对应点之间的光程相等，即出射波面和入射波面对应点之间是等光程的。

系统出现像差，等光程面偏离球面波。考虑到参考球面和实际波面在出瞳中心相切，波像差为零，各条光线的光程与通过光瞳中心的主光线的光程差即为各条光线的波像差。



对于轴对称系统，光线由物面坐标 y 和入瞳面上的坐标 η 和 ξ 确定。根据对称性分析可知，波像差表达式中只包含 $\eta^2 + \xi^2$ ， y^2 ， ηy 等基本元组成。

$$W' = a_1(\eta^2 + \xi^2) + a_2 \eta y$$

$$+ b_1(\eta^2 + \xi^2)^2 + b_2 \eta y(\eta^2 + \xi^2) + b_3 \eta^2 y^2 + b_4 y^2(\eta^2 + \xi^2) + b_5 y^3 \eta$$

$$+ c_1(\eta^2 + \xi^2)^3 + \dots$$

a_1 和 a_2 项表示轴向离焦和垂轴离焦； b_1 、 b_2 、 b_3 、 b_4 和 b_5 对应于五种初级单色像差，即球差、彗差、像散、场曲和畸变； c_1 等项对应二级像差等。

初级波像差：

$$-W' = \frac{1}{8} S_I (\bar{\eta}^2 + \bar{\xi}^2)^2 + \frac{1}{2} S_{II} \bar{\eta} y (\bar{\eta}^2 + \bar{\xi}^2) + \frac{1}{2} S_{III} \bar{\eta}^2 y^2$$

$$+ \frac{1}{4} (S_{III} + S_{IV}) y^2 (\bar{\eta}^2 + \bar{\xi}^2) + \frac{1}{2} S_V y^3 \bar{\eta}$$

$$\bar{\eta} = \eta / \eta_{\max}, \bar{\xi} = \xi / \xi_{\max}, \bar{y} = y / y_{\max}$$

赛得和数(Seidel Coefficients): $S_I, S_{II}, S_{III}, S_{IV}, S_V$

光学系统像差容限：

小像差系统(目视光学系统)：瑞利判据认为，当光学系统的最大波像差小于1/4波长时，其系统成像是完善的。

大像差系统(照相物镜)：不可使用瑞利判据。弥散斑直径 $<0.03 \sim 0.1 \text{mm}$ ，畸变 $2 \sim 4\%$ 。

6.3 像质评价与检验

评价一个光学系统的像质是根据物空间一点发出的光能量在像空间的分布状况。

按几何光学的观点来看，光学系统成像的理想状况是在像空间光能量集中在一个几何点上，但实际像差使能量分散。

多种像质评价方法，如斯特列尔准则(中心点亮度)、分辨率、几何像差曲线、波像差、点列图、光学传递函数等，从不同角度反映了光学系统的成像质量。

§ 6.3.1 斯特列尔准则(中心点亮度法)

用有像差时光学系统的点源衍射像的最大亮度与无像差时的最大亮度之比来表示系统成像质量的好坏，中心点亮度(Strehl比)：

$$S = |h(W \neq 0)|^2 / |h(W = 0)|^2 \Big|_{\substack{x=x_0 \\ y=y_0}}$$

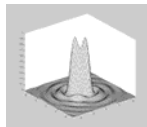
当系统的 $W=0$ 时， $S=1$ ；当系统存在的像差较小时， S 的大小能标志系统的像质好坏。

Strehl准则：中心点亮度 $S \geq 0.8$ 时，实际系统可以认为是理想的。该准则只适用于**小像差系统**。

是一个比较严格的、可靠的像质评价方法。但计算繁复，实际应用非常不便。

§ 6.3.2 分辨率

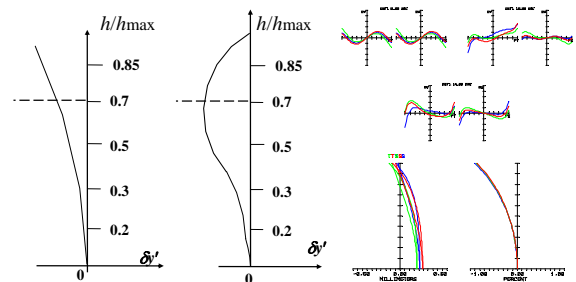
光学系统能分辨开两个像点间的最小距离，称为系统的分辨率，或称分辨能力、分辨本领、鉴别率等。该方法是从光学系统对成像的细微结构分辨能力的大小来判断像质的优劣的。



根据分辨率的定义，其大小由可分辨的两点间的最小距离决定，而这个最小间距的大小又与所谓“可分辨”这个标准有关。**瑞利**对此直接了当地提出一个规定：“能分辨开的两点间的间隔等于爱里斑的半径”。依据这一规定，对于**等强度**的两个**非相干点源**，它们所产生的衍射图样靠近到其中一个最大值与另一个的第一极小值位置相重合时，则认为这两点能够分辨。

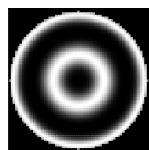
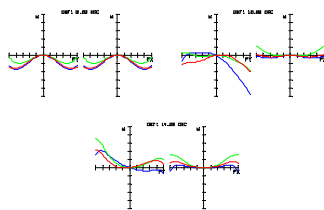
§ 6.3.3 几何像差曲线

根据光线追迹计算不同孔径、不同视场、不同波长的像点位置，描述不同像差的规律，判断成像质量。



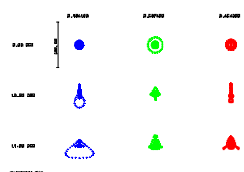
§ 6.3.4 波像差

各条光线的光程与通过光瞳中心的主光线的光程差即为各条光线的波像差。



§ 6.3.5 点列图

由一点发出的许多光线经光学系统以后，由于像差的作用与像面的交点不再位于同一点，而是形成了散开的图形，称之为**点列图**。用点列图中点的密集程度可以衡量光学系统成像质量的优劣。

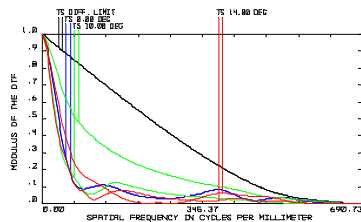


追迹的光线越多，点越多，就越能精确地反映出像上光强分布情况。

由于忽略了光的衍射作用，只能**适用于大像差系统**。当点列图散布范围大于10到20倍爱里斑时，用几何光线追迹所描绘的点物成像的能量分布与实际情况符合地较好，由光线与像面的交点弥散情况，可以决定光亮度的分布。

§ 6.3.6 光学传递函数

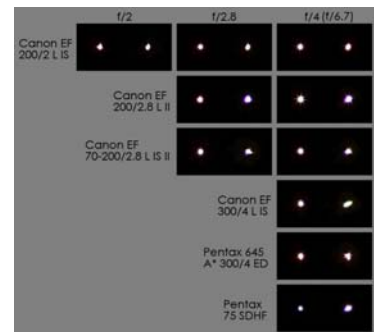
光学传递函数评价光学成像系统的方法不是直接从点扩散函数的空间性质规定评价指标，而是在**空间频域**中对其进行频谱分析。通过研究一种特殊形式的物——**正弦波振幅光栅**的成像特性来评价光学系统的成像质量的优劣。



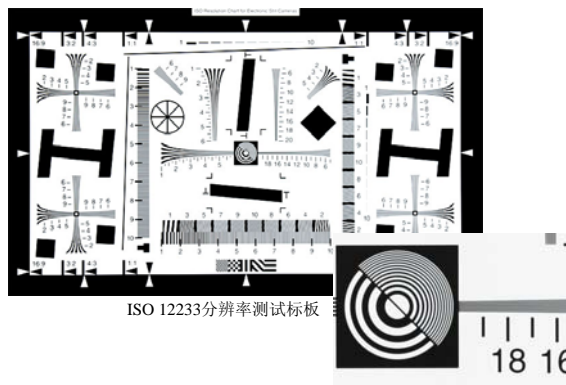
§ 6.3.7 像质 检验

星点检测

根据弥散斑的大小和能量分布情况，也就是直观观察像的大小、形状和颜色等，可以评定系统成像质量的优劣（可以分解为不同的像差）。

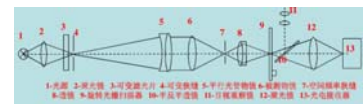


鉴别率板



传函仪

传递函数的测量系统一般具有点源或狭缝光源、扩束系统，经被测透镜组聚焦后，由光电阵列探测器接收到点源或狭缝像，经傅氏变换得到传递函数曲线。



小结：

光线追迹

包含折反射面、衍射面的光线追迹

实际光线追迹

几何像差

单色像差：球差、彗差、像散、场曲、畸变

位置色差、倍率色差

波像差

像质评价与检验

光学传递函数、点列图、分辨率等

作业：

1、任选双胶合透镜，给定物的位置和高度，编程进行光线追迹，并绘制出几何单色像差曲线。