

目录

0.1	计算程序原理阐述	1
0.1.1	光线追迹原理	1
0.1.2	像差计算原理	4

插图

0.1 计算程序原理阐述

0.1.1 光线追迹原理

计算前提：孔径光阑位于系统的第一面。

系统参数：入瞳直径 a , 系统第 k 面的曲率 ρ_k , 系统第 k 面到第 $k+1$ 面的距离 d_k , 系统第 k 面与第 $k+1$ 面之间的折射率 n_k 。第零面折射率为空气折射率 $n_0 = 1$ 。

第一近轴光线追迹

入射光线参数：物距 l , 孔径系数 K_u

参数初始化： $l_1 = l$, 若 $l = -\infty$, 则 $u_1 = 0$, 入射角 $i_1 = \rho_1 \cdot a/2$; 若 $l > -\infty$, 则 $u_1 = \arctan(a/2l_1)$, 入射角 $i_1 = u_1 \cdot (\rho_1 l_1 - 1)$ 。

循环计算公式：

$$\begin{aligned} i_k &= (\rho_k l_k - 1) \cdot u_k \\ u'_k &= \frac{n_k - n_{k-1}}{n_k} \cdot i_k + u_k \\ l'_k &= \frac{i_k + u_k}{\rho_k u'_k} \end{aligned}$$

参数更新公式：

$$\begin{aligned} l_{k+1} &= l'_k - d_k \\ u_{k+1} &= u'_k \end{aligned}$$

第一实际光线追迹

入射光线参数：物距 l , 孔径系数 K_u 。

参数初始化： $l_1 = l$, 若 $l = -\infty$, 则 $U_1 = 0$, 入射角 $I_1 = \arcsin(K_u \cdot \rho_1 a/2)$; 若 $l > -\infty$, 则 $U_1 = \arcsin(K_u \cdot \sin(\arctan(a/2l_1)))$, 入射角 $I_1 = \arcsin((l_1 \rho_1 - 1) \cdot \sin U_1)$ 。

循环计算公式：

$$\begin{aligned}
 I_k &= \arcsin [(l_k \rho_k - 1) \cdot \sin U_k] \\
 I'_k &= \arcsin \left[\frac{n_{k-1}}{n_k} \cdot \sin I_k \right] \\
 U'_k &= U_k + I_k - I'_k \\
 l'_k &= \frac{1}{\rho_k} \left(1 + \frac{\sin I'_k}{\sin U'_k} \right)
 \end{aligned}$$

参数更新公式：

$$\begin{aligned}
 l_{k+1} &= l'_k - d_k \\
 u_{k+1} &= u'_k
 \end{aligned}$$

第二近轴光线追迹

入射光线参数：物距 L ，物高 y 或视场角 W ，孔径系数 K_u ，视场系数 K_w 。

参数初始化： $l_1 = L$ ，若 $l = -\infty$ ，则 $u_1 = \sin(K_w \cdot W)$ ，若 $l > -\infty$ ，则 $u_1 = \sin \left(\arctan(K_w \cdot \frac{y}{L}) \right)$

循环计算公式：

$$\begin{aligned}
 i_k &= u_k \cdot (\rho_k l_k - 1) \\
 i'_k &= i_k \cdot \frac{n_{k-1}}{n_k} \\
 u'_k &= \frac{n_k - n_{k-1}}{n_k} \cdot i_k + u_k \\
 l'_k &= \frac{1}{\rho_k} \left(1 + \frac{i'_k}{u'_k} \right)
 \end{aligned}$$

参数更新公式：

$$\begin{aligned}
 l_{k+1} &= l'_k - d_k \\
 u_{k+1} &= u'_k
 \end{aligned}$$

第二实际光线追迹

入射光线参数：物距 L ，物高 y 或视场角 W ，孔径系数 K_u ，视场系数 K_w ，光线标签 $label$ （区分上光线、下光线、主光线）。

参数初始化：

若 $L = -\infty$, 已知光线视场角 W 。 $U_1 = K_w \cdot W$, 对于上光线, $l_1 = K_u \cdot \frac{a}{2 \tan U_1}$; 对于下光线, $l_1 = -K_u \cdot \frac{a}{2 \tan U_1}$; 对于主光线, $l_1 = 0$, 定义计算像散场曲所需要的变量 $t_1 = s_1 = -\infty$ 。

若 $L > -\infty$, 则已知光线对应的物高 y 。

对于上光线, $U_1 = -\arctan\left(\frac{-y \cdot K_w + K_u \cdot a/2}{L}\right)$, $l_1 = K_u \cdot \frac{a - y \cdot K_w + K_u \cdot a/2}{L}$;
 对于下光线, $U_1 = -\arctan\left(\frac{-y \cdot K_w - K_u \cdot a/2}{L}\right)$, $l_1 = -K_u \cdot \frac{a - y \cdot K_w + K_u \cdot a/2}{L}$;
 对于主光线, $U_1 = \arctan\left(\frac{K_w \cdot y}{L}\right)$, $l_1 = 0$, $s_1 = t_1 = -\sqrt{y^2 + L^2}$ 。

循环计算公式:

$$\begin{aligned} I_k &= \arcsin[(l_k \rho_k - 1) \cdot \sin U_k] \\ I'_k &= \arcsin\left[\frac{n_{k-1}}{n_k} \cdot \sin I_k\right] \\ U'_k &= U_k + I_k - I'_k \\ l'_k &= \frac{1}{\rho_k} \left(1 + \frac{\sin I'_k}{\sin U'_k}\right) \\ PA_k &= \frac{l_k \sin U_k}{\cos((I_k - U_k)/2)} \\ X_k &= PA_k^2 \cdot \rho_k / 2 \end{aligned}$$

对于主光线, 循环计算公式中增加两项:

$$\begin{aligned} D_k &= \frac{d_k - X_k + X_{k+1}}{\cos(U'_k)} \\ t'_k &= n'_k \cos^2 I'_k \cdot \left[\frac{n_k \cos^2 I_k}{t_k} + \rho_k (n'_k \cos I'_k - n_k \cos I_k)\right]^{-1} \\ s'_k &= n'_k \cdot \left[\frac{n_k}{s_k} + \rho_k (n'_k \cos I'_k - n_k \cos I_k)\right]^{-1} \end{aligned}$$

参数更新公式:

$$\begin{aligned} l_{k+1} &= l'_k - d_k \\ U_{k+1} &= U'_k \end{aligned}$$

主光线的更新公式也增加两项：

$$\begin{aligned} t_{k+1} &= t'_k - D_k \\ s_{k+1} &= s'_k - D_k. \end{aligned}$$

计算中的 X 为矢高， X 和 PA 均保存在透镜参数中， t 和 s 均保存在光线参数中，在计算像散和场曲时调用。

0.1.2 像差计算原理

计算理想像高

已知物距 l ，物高 y_0 或视场角 W ，视场系数 K_w 。

若 $l = -\infty$ ，则

$$y'_0 = f' \tan(K_w \cdot W).$$

若 $l > -\infty$ ，则

$$y'_0 = K_w \cdot \beta \cdot y_0,$$

其中 $\beta = \beta_1 \cdots \beta_n$ 。

初始化： $l_1 = l, u_1 = \arctan(a/2l_1), n_0 = 1$

迭代计算公式为：

$$\begin{aligned} i_k &= (\rho_k l_k - 1) u_k \\ u'_k &= \frac{n_k - n_{k-1}}{n_k} \cdot i_k + u_k \\ l'_k &= \frac{i_k + u_k}{\rho_k u'_k} \\ \beta_k &= -\frac{l'_k}{l_k} \end{aligned}$$

更新方式为：

$$\begin{aligned} l_{k+1} &= l'_k - d_k \\ u_{k+1} &= u'_k \end{aligned}$$

计算实际像高

利用已定义的光线追迹函数计算出第一近轴光线和第二实际光线的出射光线，得到二者的像距 l'_0, l'_1 和出射孔径角 U'_0, U'_1 ，易知 l'_0 即为理想像面

的位置。

实际像高为：

$$y' = (l'_1 - l'_0) \cdot \tan(U'_1).$$

此处应注意，对 F,C,d 光均应以主光线的理想像面为 l'_0 ，在代码中体现为使用主光线折射率重新建立光学系统并对第一近轴光进行追迹以获得像面位置。

球差

利用已定义的光线追迹函数计算出第一近轴光线和第一实际光线的出射光线，得到二者的像距 l'_0, l' ，则球差为：

$$\delta L' = l' - l.$$

畸变

计算理想像高和实际像高 y'_0 和 y' ，则绝对畸变

$$\delta y' = y' - y'_0,$$

相对畸变

$$\frac{\delta y'}{y'_0} = \frac{y' - y'_0}{y'_0}.$$

位置色差

0 孔径时，对第一近轴光线的 F 光和 C 光进行光线追迹；其他孔径时（可以设置一个近轴光线的孔径范围），对第一实际光线的 F 光和 C 光进行光线追迹。

得到出射光线的像距 l'_F 和 l'_C ，位置色差为：

$$\delta l'_{ch} = l'_F - l'_C.$$

倍率色差

利用像高计算函数计算 F 光和 C 光的出射光线的实际像高 y'_F 和 y'_C ，则倍率色差为：

$$\delta y'_{ch} = y'_F - y'_C.$$

彗差

对第一近轴光线进行光线追击得到理想像面位置 l'_0 ；利用前面一些好的函数求得给定主光线的像高 y'_p ，利用前面已写好的函数对第二实际光线的上光线和下光线进行光线追迹，得到出射光线的像距 l'_{up}, l'_{down} 和像方孔径角 U'_{up}, U'_{down} ，则上光线像高 $y'_{up} = (l'_{up} - l'_0) \tan U'_{up}$ ，下光线像高 $y'_{down} = (l'_{down} - l'_0) \tan U'_{down}$ 。（子午）彗差为：

$$K'_t = \frac{y'_{up} + y'_{down}}{2} - y'_p.$$

像散和场曲

对第一近轴光线进行光线追击得到理想像面位置 l'_0 ，对第二实际光线进行光线追可以得到出射光线的 U, t, s 以及系统最后一个面的矢高 X ，则像散和场曲分别为：

$$x'_t = t \cos U + X - l'_0$$

$$x'_s = s \cos U + X - l'_0$$

$$\Delta x' = x'_t - x'_s$$

参考文献

- [1] 李晓彤, 光学. 几何光学 · 像差 · 光学设计 [M]. 浙江大学出版社, 2014.