

第十章 波像差

§ 10-1 波像差及其与几何像差的关系

§ 10-2 波像差的一般表示式

§ 10-3 参考点移动引起的波像差, 焦深

§ 10-4 色差的波像差表示

§ 10-5 球色差、几何色差与波色差的关系

§ 10-6 光学系统的像差容限

§ 10-1 波像差及其与几何像差的关系

光线——波面的法线 波像差——实际波面对理想波面的偏离

例 轴上点A以单色光成像 $\begin{cases} A_0' \\ A' \end{cases}$ 存在球差 $\delta L' = L' - l'$

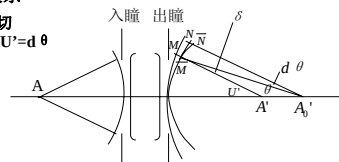
$A'M$ 交理想波面于 M , $M \bar{M} \cdot n$ 即为波差。(以理想波面为基准, 右负左正)

一、轴上点的波像差及其与球差的关系

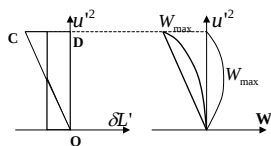
实际波面、参考波面在出瞳中心相切
当 U' 改变 dU' 时, 由于 $U' \approx \theta$, 故 $dU' = d\theta$

波像差

$$W = \int dW = \frac{n'}{2} \int_0^{u_m} \delta L' du'^2$$



球差相当的波像差为以 u' 为纵坐标, 以 $\delta L'$ 为横坐标的球差曲线与纵轴所围面积的一半



当物方无穷远时, $u' = h/f'$

$$W = \frac{n' h_m^2}{2 f'^2} \int_0^1 \delta L' d \left(\frac{h}{h_m} \right)^2$$

讨论

1. 当仅有初级量时, $\delta L' = Bu'^2$

$$W_{\max} = \frac{n'}{2} S_{\Delta O C D} = \frac{n'}{4} \delta L' u_m'^2$$

以波长为单位时, $W_{\max} = \frac{n'}{4\lambda} \delta L' u_m'^2$ 边缘处波像差最大

移动接收面, 以接收面为基准, 则球差将改变, 波像差曲线随之改变。

上图中, 不离焦时高斯面上 $W_{\max} = \frac{n'}{4} \delta L' u_m'^2$ 若达不到瑞利判据,

离焦 $\frac{1}{2} \delta L'_m$ $W_{\max} = \frac{1}{4} \times \frac{n'}{4} \delta L' u_m'^2 = \frac{n'}{16} \delta L' u_m'^2$ 可望达到瑞利判据

离焦

2. 当有初级和二级球差时, $\delta L' = A_1 h^2 + A_2 h^4$ 当 $l_1 \rightarrow -\infty, u' = \frac{h}{f'}$

$$W = \frac{n' h_m^2}{2 \lambda f'^2} \int_0^1 \delta L' d \left(\frac{h}{h_m} \right)^2$$

当对边光校正球差时, 0.707带光有最大剩余球差

若离焦, 使图中三部分面积相同, 则

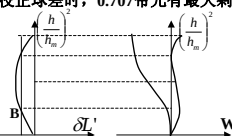
应轴向离焦 $\frac{3}{4} \delta L'_{0.707}$

$$此时 W^* = \frac{n' h_m^2}{2 f'^2} S_{\Delta O A B} = \frac{n' h_m^2}{2 f'^2} \cdot \frac{1}{12} \delta L'_{0.707}$$

显然, 同样满足瑞利判据, 允许的剩余球差要大得多。

3. 若再有三级以上球差, 则像差平衡的原则是:

尽可能离焦后有多多个大小相等、符号相反的小面积。



二、轴外点的波像差及其与垂轴像差的关系

轴外任意一点的像差, 可以用 $\delta y'$, $\delta z'$ 两个分量表示

W 应表示成与这两个分量之间的关系

B_0' 的波面为球面

B' 波面与球面在 P' 相切

B' 波面的法线是到达该点的空间光线

波像差——二波面之间的距离 $\overline{QQ_R} \cdot n'$

可导出: $W = \frac{n'}{R} \int (\delta x' d\eta' + \delta y' d\zeta')$

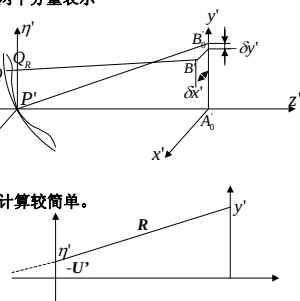
上式计算很麻烦, 但沿子午截线的波像差计算较简单。

子午光线: $y' - \eta' = -R \sin U'$

$$\therefore d\eta' = R d \sin U'$$

$$\text{则 } dW = \eta' \delta y' d \sin U'$$

$$\therefore W = n' \int \delta y' d \sin U'$$



$\delta y'$ 与 $\sin U'$ 的关系曲线:

曲线对 $\sin U'$ 轴所围的面积表征波像差的大小。参考点为高斯像点。

但高斯像点亦不一定是最佳参考点。

离焦

离焦

垂轴离焦: 对各条光线 $\delta y'$ 均改变同样值。

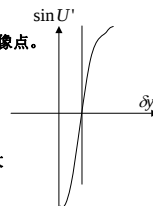
——坐标平移

沿轴离焦: 纵轴转一角度, 以形成尽可能相等的大小相同、符号相反的小面积

注意

1. 垂轴离焦只为评价像质, 轴向离焦才为确定最佳像面位置。
2. $\Delta l'_{\text{轴外}}$ 沿轴离焦只能对某一视场而言, 不同的视场有不同的沿轴离焦要求, 不能同时满足。
3. 轴向离焦中, $\Delta l'_{\text{轴上}}$ 与 $\Delta l'_{\text{轴外}}$ 也不能同时满足。

应寻求最佳平衡



§ 10-3 参考点移动引起的波像差, 焦深

由 $W = \frac{n'}{2} \int_0^{u_m} \delta L' du'^2$ 轴向离焦: $\Delta W = \frac{n'}{2} \int \Delta L' du'^2 = \frac{n'}{2} \Delta L' u_m'^2$
垂轴离焦: $\Delta W = n' \Delta y' \sin U_m'^2 = n' \Delta y' u_m'^2$

当光学系统为理想系统时, 高斯面上波像差为零。若底片移动 $\Delta L'$, 则可按上式计算新的 W 。若

$W_{\text{新}} \leq \frac{\lambda}{4}$ 则可认为该系统仍为理想系统。这时焦深为 $2\Delta L'$ 。

由上可得 $\Delta L' \leq \frac{\lambda}{2n' u_m'^2}$ 所以 $2\Delta L' = \frac{\lambda}{n' u_m'^2}$

焦深与像方孔径有关。像方孔径大则焦深小。

例

$\frac{D}{f'} = \frac{1}{5} \Rightarrow u_m' = 0.1 \Rightarrow 2\Delta L' = 100\lambda = 0.05\text{mm}$

§ 10-4 色差的波像差表示

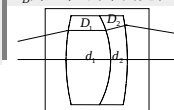
波色差

几何像差 $\left\{ \begin{array}{l} \delta L_D' \rightarrow \text{波像差 } W_D \\ \delta L_F' \rightarrow \text{波像差 } W_F \\ \delta L_C' \rightarrow \text{波像差 } W_C \end{array} \right\} \quad \delta L'_{ch} = L_F' - L_C' \Rightarrow W_{FC} = W_F - W_C$

W ——某一孔径带的光线与近轴光线的光程之差。 $W = \sum (Dn) - \sum (dn)$

$W_{FC} = [\sum (D_F n_F) - \sum (dn_F)] - [\sum (D_C n_C) - \sum (dn_C)]$
 $= \sum (D_F n_F - D_C n_C) - \sum d(n_F - n_C)$
 $\approx \sum D_D (n_F - n_C) - \sum d(n_F - n_C)$
 $= \sum (D - d) dn$

D_D 为 F 与 C 的中间光程



§ 10-5 球色差、几何色差与波色差的关系

一、球色差

当 $W_{FCm} = \sum (D - d) dn = 0$ 时 边光环带的 F 、 C 波面相交, 但 F 、 C 光由于球差存在, 在其它环带波面不相交, 称球色差。

二、几何色差与波色差的关系

一般光学系统: $\delta L_{ch}' = a_0 + a_1 h^2$

校正色差要求: $\delta L_{chz}' = 0$

此时 $\delta L_{chm}' = -\delta L_{ch}' = -a_0$

当0.707环带 $\delta L_{chz}' = 0$ 相当于 $W_{FCm} = 0$

校正色差 $\left\{ \begin{array}{l} \text{几何色差——带光消} \\ \text{波色差——边光消, 0.707带有最大剩余波色差, 该最大值为极小。} \end{array} \right.$

§ 10-6 光学系统的像差容限

——什么程度的像差是允许的 (根据使用条件)

一、小像差系统 (如目视光学仪器) ——瑞利判据

要求: 最大剩余波像差 $\leq \frac{\lambda}{4}$

1. 色差 $W_{FC} \leq \frac{\lambda}{4} \sim \frac{\lambda}{2}$

2. 球差

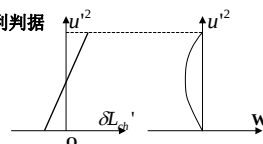
①当 U 很小, $\delta L' = Ah^2$ 离焦 $\frac{1}{2} \delta L_m'$ 后

所以 $\delta L_m' \leq 4 \frac{\lambda}{n' u_m'^2} = 4 \text{倍焦深}$

②当 U 有一定大小, $\delta L' = A_1 h^2 + A_2 h^4$ 使边光球差为零, 0.707带有最大剩余球差

作 $\frac{3}{4} \delta L'_{0.707}$ 离焦 $W = \frac{n' u_m'^2}{24} \delta L \leq \frac{\lambda}{4}$ $\delta L'_{0.707} = 6 \frac{\lambda}{n' u_m'^2} = 6 \text{倍焦深}$

(边光不一定恰好校正到零, 允许残余1倍焦深)



3. 正弦差

$osc \leq \frac{\lambda}{2n' y_0' \sin U_m'}$

弧矢慧差

$K_s \leq \frac{\lambda}{2n' \sin U_m'}$

小视场大孔径系统到此为止, 以下针对大视场系统

4. 像散

$\Delta x' = \frac{\lambda}{n' \sin^2 U_m'} = 1 \text{倍焦深}$

5. 像面弯曲: 在人眼调节范围之内

6. 畸变

$\frac{\delta y'}{y'} \leq 2 \sim 5\%$

7. 倍率色差:

角度 $\leq 2' \sim 4'$

二、大像差系统 (如摄影物镜) ——应校正全部像差

此时不可用瑞利判据, 而要求 弥散斑直径 $\leq 0.03 \sim 0.1\text{mm}$

畸变 $2 \sim 4\%$ (要求观察者看不出像的明显变形)

§ 10-7 像质评价方法

几何像差曲线

