



应用光学

Applied Optics

任课教师：陈 瑞

电子邮箱：chenr229@mail.sysu.edu.cn

助教安排：柳夏、石福隆

答疑时间：周四下午2:30-3:30，爪哇堂307

中山大学 物理学院
2021-1



像差理论

几何像差



Ch 10 波像差：与像质评价指标和光学检测相联系；

Ch 11 光线追迹-光路计算

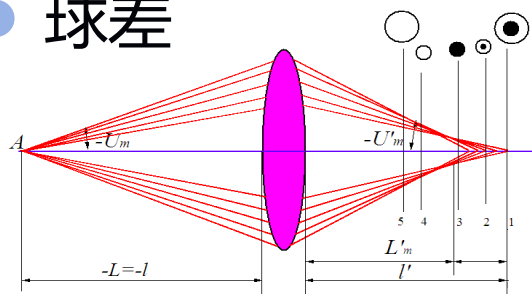


像差理论-七种像差

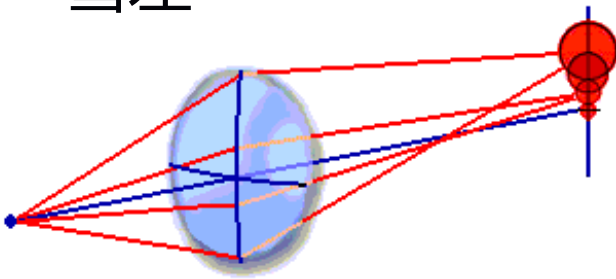
像差形式	形成原因	主要影响	决定因素	如何校正
球差	不同倾角的入射光线造成像点的位置偏离	圆形弥散斑，成像变得模糊	光学元件的形状和材料	初级球差与高级球差的相互补偿
彗差	轴外点宽光束的主光线与球面对称轴不重合	彗星状的弥散斑，破坏成像清晰度	与视场、孔径以及透镜形状都有关	选择光阑位置，使用对称结构
像散	两主截面的曲率不同，聚焦为子午和弧矢像点，形成像散	轴外点得不到清晰像	远离光轴的像差，随视场增大而增大	控制入瞳位置
场曲	球面固有性质决定的	较大的平面物体各点不能同时清晰成像	远离光轴的像差，随视场增大而增大	控制入瞳位置
畸变	通过入瞳中心的主光线的球差造成的	仅引起像的变形，不影响成像清晰度；	主光线决定的畸变与视场有关，与孔径无关	控制入瞳位置
位置色差	同种材料对不同波长的光折射率不同	彩色弥散斑，成像变得模糊	光学元件的形状和材料	相互补偿
倍率色差	放大率随折射面间介质折射率变化而引起的	破坏成像清晰度，造成白光像的模糊	随视场的增大而变得严重	相互补偿与抵消

七种像差

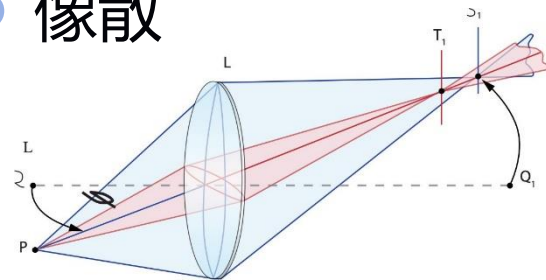
● 球差



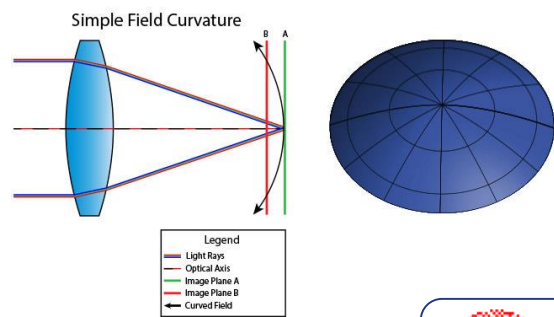
● 彗差



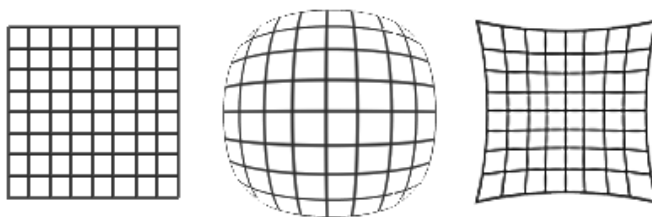
● 像散



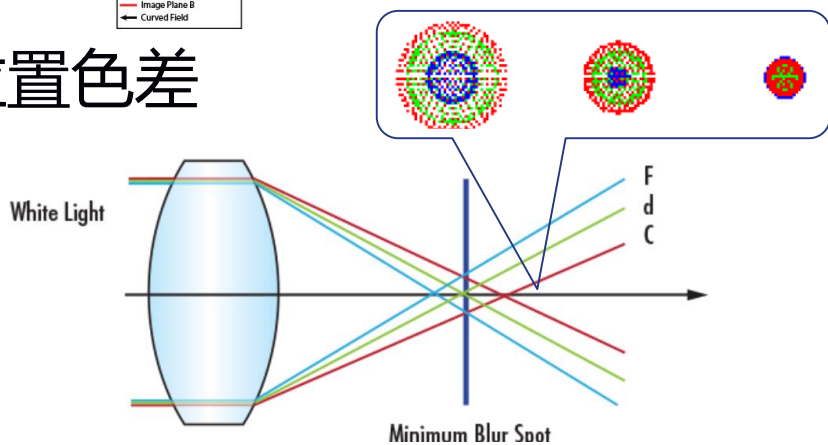
● 场曲



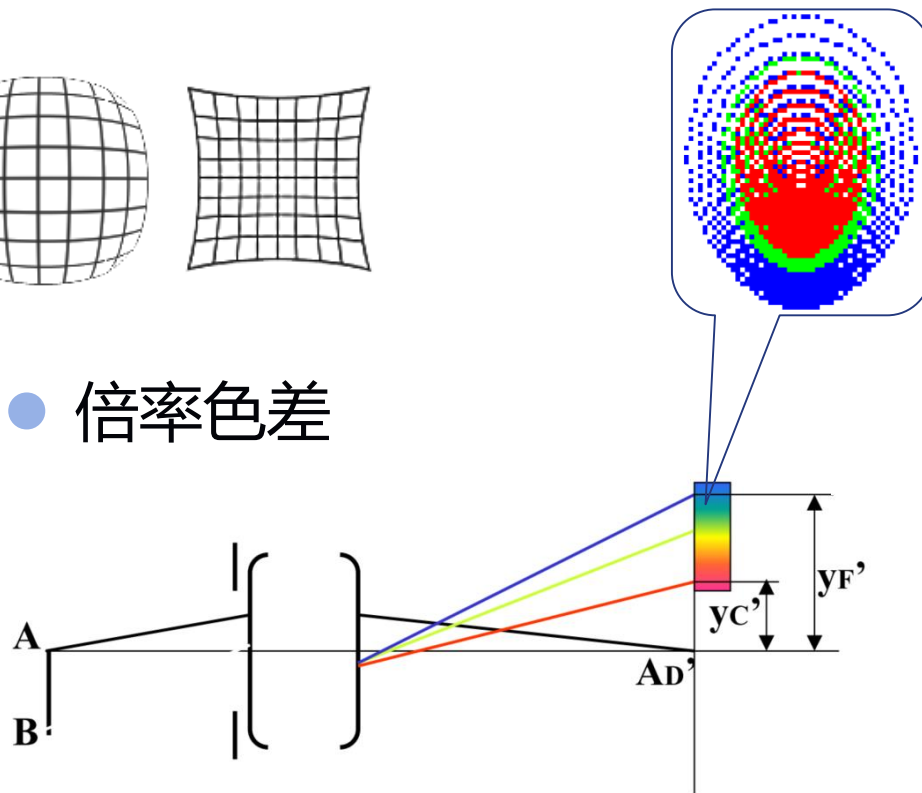
● 畸变



● 位置色差



● 倍率色差





初级像差 P141

球差: $\delta L'_0 = -\frac{1}{2n'u'^2} \sum S_I, \quad \sum S_I = \sum l u n i (i - i') (i' - u) \propto u^3 W^0$

弧矢彗差: $K'_s = -\frac{1}{2n'u'} \sum S_{II}, \quad \sum S_{II} = \sum S_I \frac{i_p}{i} \propto u^2 W^1$

像散: $x'_{sp} = -\frac{1}{2n'u'^2} \sum S_{III}, \quad \sum S_{III} = \sum S_{II} \frac{i_p}{i}$

像面弯曲: $x'_p = -\frac{1}{2n'u'^2} \sum S_{IV}, \quad \sum S_{IV} = J^2 \sum \frac{n' - n}{n' n r} \propto u^1 W^2$

畸变: $\delta y' = -\frac{1}{2n'u'} \sum S_V, \quad \sum S_V = \sum (S_{III} + S_{IV}) \frac{i_p}{i} \propto u^0 W^3$

位置色差: $\delta l'_{ch} = -\frac{1}{n'u'^2} \sum C_I, \quad \sum C_I = \sum l u n i \left(\frac{dn'}{n'} - \frac{dn}{n} \right)$

倍率色差: $\delta l'_{ch} = -\frac{1}{n'u'} \sum C_{II}, \quad \sum C_{II} = \sum C_I \frac{i_p}{i}$

塞得和数

色差和数



第十章 波像差

实际光学系统成像质量是像差的综合影响，各种像差之间具有很强的相关性，因此，必须考虑像差的最佳校正方案，并根据系统的使用要求和使用状况给出合理的像差，与这些像质评价问题相关的是光学系统的**波像差**。

主要内容

- 10.1 波像差概念
- 10.2 波像差与几何像差的关系
- 10.3 色差的波像差表示
- 10.4 光学系统的像差容限
- 10.5 像质评价方法



第十章 波像差

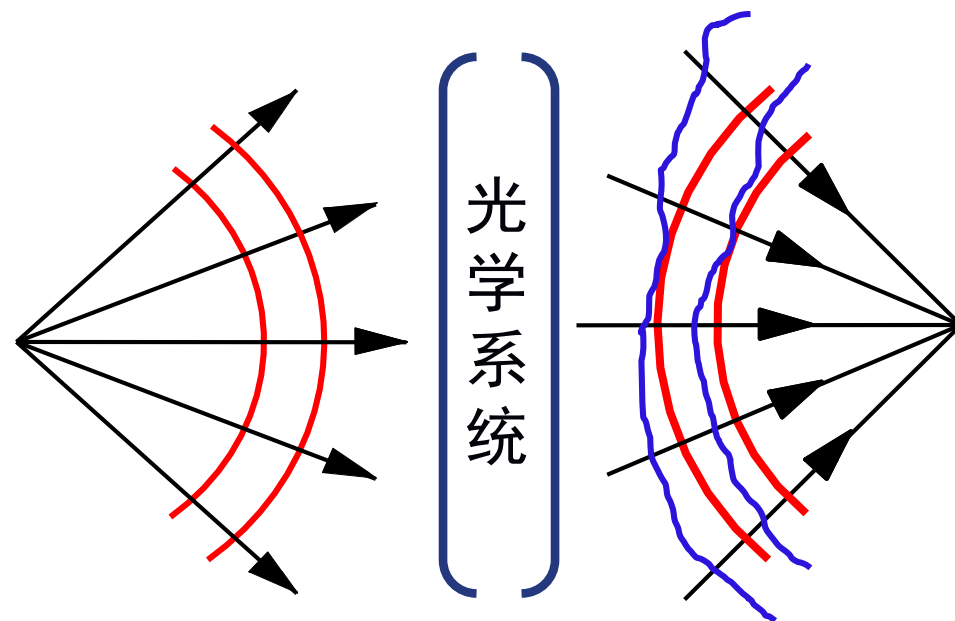
实际光学系统成像质量是像差的综合影响，各种像差之间具有很强的相关性，因此，必须考虑像差的最佳校正方案，并根据系统的使用要求和使用状况给出合理的像差，与这些像质评价问题相关的是光学系统的**波像差**。

主要内容

- 10.1 波像差概念
- 10.2 波像差与几何像差的关系
- 10.3 色差的波像差表示
- 10.4 光学系统的像差容限
- 10.5 像质评价方法

10.1 波像差概念

- 几何光学中的光线相当于波阵面的法线，因此，物点发出的同心光束与球面波对应；
- 理想光学系统不改变球面波的曲率，形成一个新的球面波，球心即为物点的理想像点；
- 实际光学系统的像差将使得出射波面变形，不复为理想的球面波；



波像差(wave aberration): 实际波面相对于理想波面的**偏离**。



第十章 波像差

实际光学系统成像质量是像差的综合影响，各种像差之间具有很强的相关性，因此，必须考虑像差的最佳校正方案，并根据系统的使用要求和使用状况给出合理的像差，与这些像质评价问题相关的是光学系统的**波像差**。

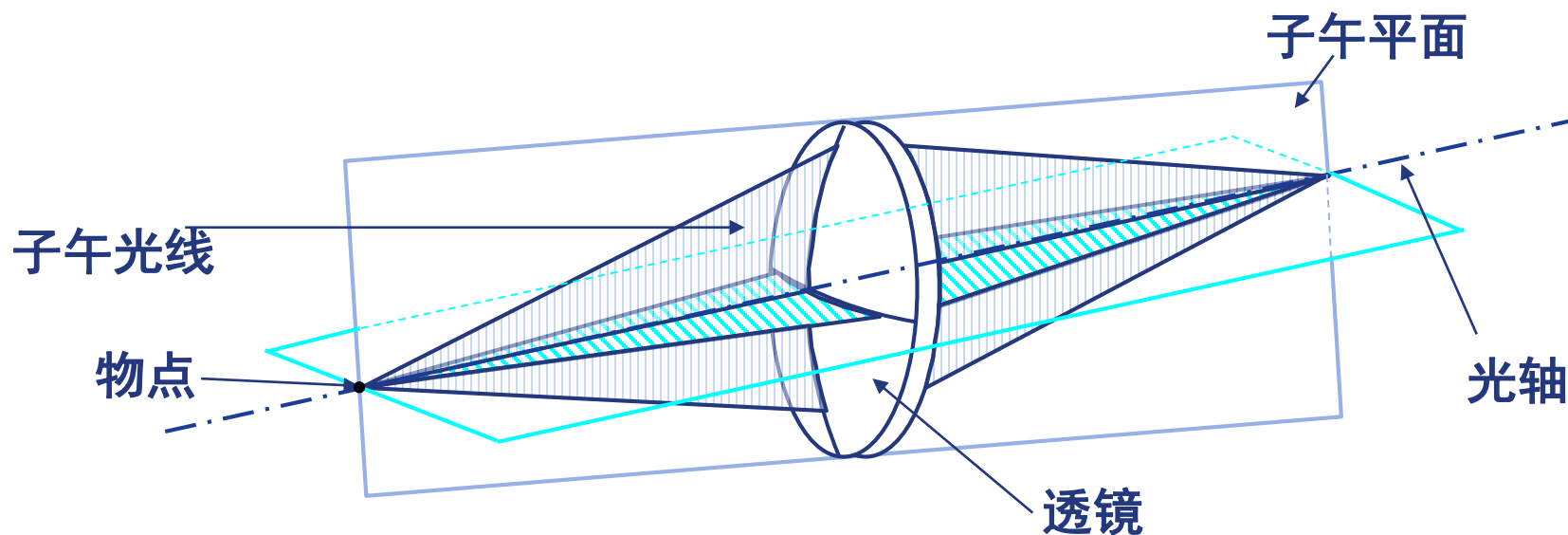
主要内容

- 10.1 波像差概念
- 10.2 波像差与几何像差的关系
- 10.3 色差的波像差表示
- 10.4 光学系统的像差容限
- 10.5 像质评价方法

10.2 波像差与几何像差的关系

一. 轴上点波像差

- **特点：**波面轴对称、球差是唯一像差
- **轴上点的波像差：**只需要从波面与子午平面相截的截线上，取其光轴以上的一半考虑即可；





10.2 波像差与几何像差的关系

一. 轴上点波像差

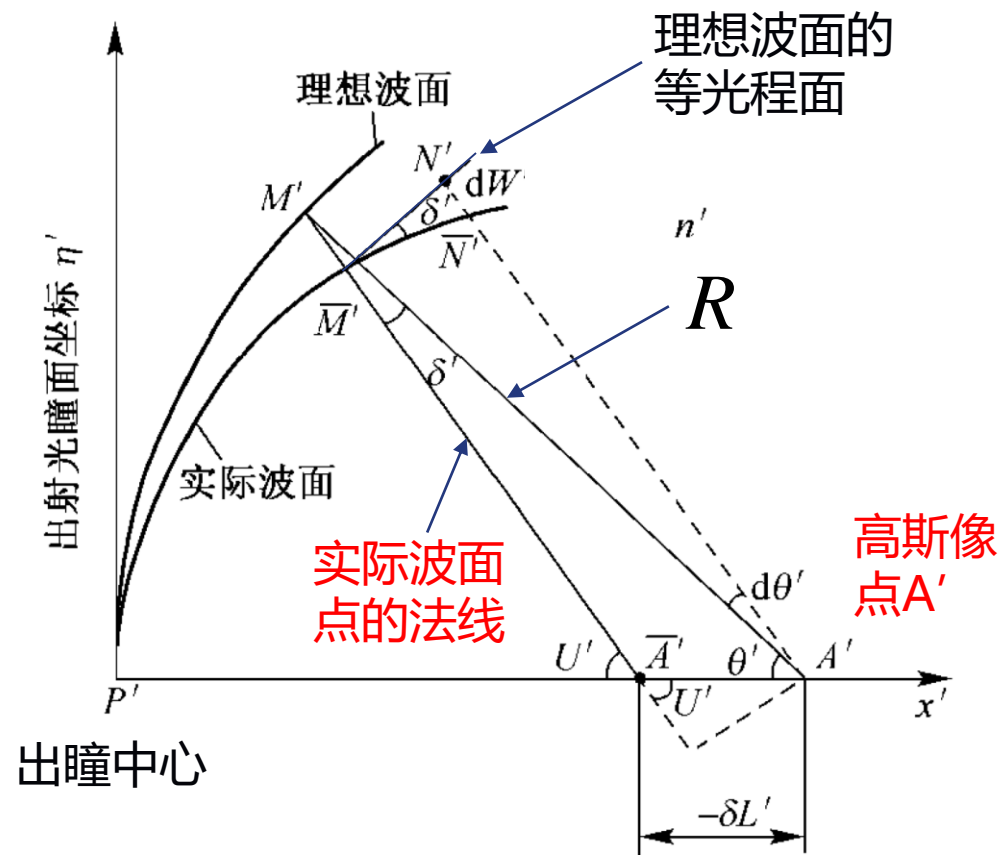
- 实际波面的法线 $\bar{M}\bar{A}'$ 交理想球面于点 M' ，则距离 $\bar{M}M'$ 乘以该空间的折射率 n' 即为波像差，用 W 表示。
- **波像差**就是实际波面与理想波面之间的**光程差**；规定实际波面在理想波面之后是波像差为负，反之为正。

$$dW = n' \delta L' \sin U' dU'$$

孔径较小时: $\sin U' \approx u' \rightarrow W = \int dW = \frac{n'}{2} \int_0^{u'_m} \delta L' du'^2$

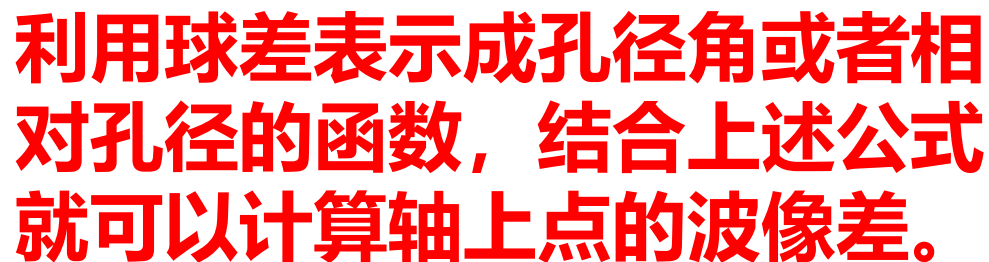
$$\left\{ \begin{aligned} \delta' &= -\frac{\delta L' \sin U'}{R} \\ \delta' &= -\frac{dW / n'}{R d\theta'} \approx -\frac{1}{n'} \frac{dW}{R \cdot dU'} \end{aligned} \right.$$

该式表述的就是波像差与球差的关系，如以 u'^2 为纵坐标画出球差曲线，**曲线所包围的面积的一半就是波像差。**




$$W = \int dW = \frac{n'}{2} \int_0^{u'_m} \delta L' du'^2$$
$$W = \int dW = \frac{n'}{2f'^2} \int_0^{h_m} \delta L' dh^2$$

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





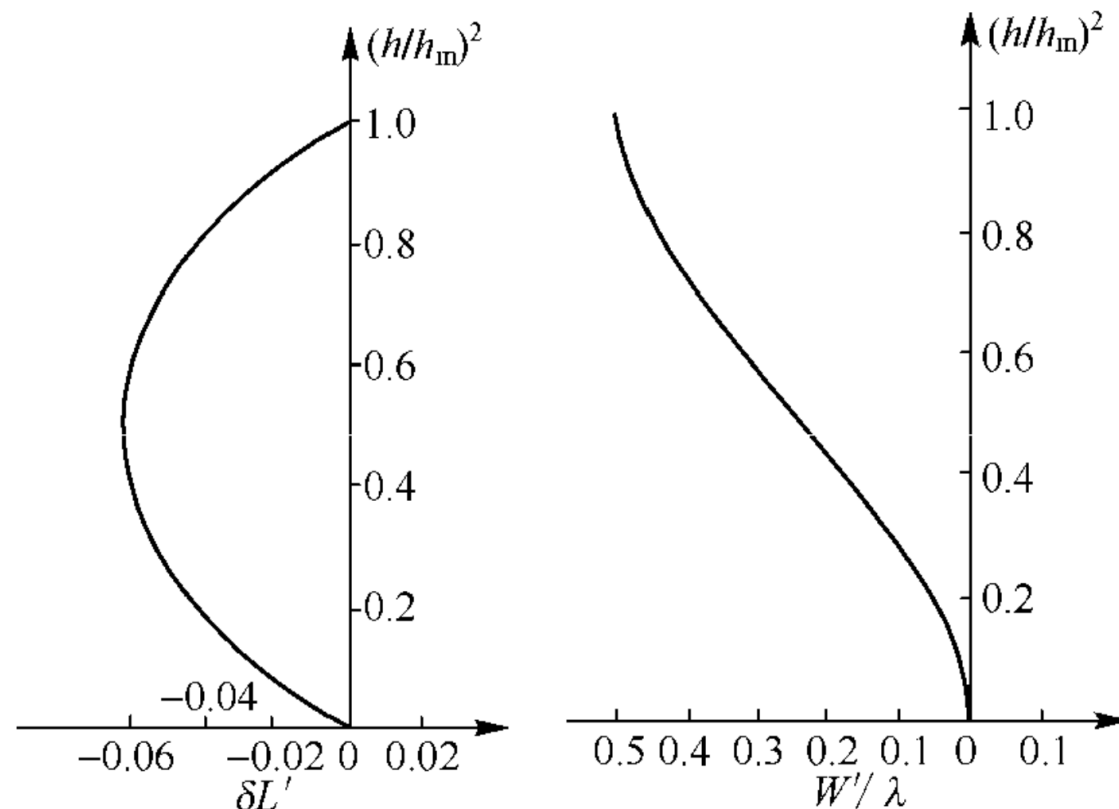
10.2 波像差与几何像差的关系

一. 轴上点波像差

例：P154以双胶合透镜组，结构参数 $h_m = 10\text{mm}$, $f' = 79.563\text{mm}$

球差： $\delta L' = -0.22 \left(\frac{h}{h_m} \right)^2 + 0.22 \left(\frac{h}{h_m} \right)^4$

$$\begin{aligned} \frac{W}{\lambda} &= \frac{n'h_m^2}{2\lambda f'^2} \int_0^1 \delta L' d \left(\frac{h}{h_m} \right)^2 \\ &= \frac{n'h_m^2}{2\lambda f'^2} \left[\frac{-0.22}{2} \left(\frac{h}{h_m} \right)^4 + \frac{0.22}{3} \left(\frac{h}{h_m} \right)^6 \right] \end{aligned}$$



(a) 以 (h/h_m) 为纵坐标的球差曲线 (b) 相应的波像差曲线

取D光, $\lambda = 589.3\text{nm}$



10.2 波像差与几何像差的关系

一. 轴上点波像差

h/h_m	0.2	0.4	0.6	0.707	0.8	0.9	1.0
$(h/h_m)^2$	0.04	0.16	0.36	0.50	0.64	0.81	1.0
球差	-0.008	-0.029	0.050	-0.055	-0.053	-0.037	0.000
波像差(λ)	-0.0023	-0.0335	-0.144	-0.246	-0.415	-0.045	-0.492

物镜在不同孔径时的球差与波像差 (589.3nm)

- 边缘处像差最大，约为半个波长；
- **瑞利判据**：绝对值计算的最大像差小于1/4波长时，可认为系统是完善的。

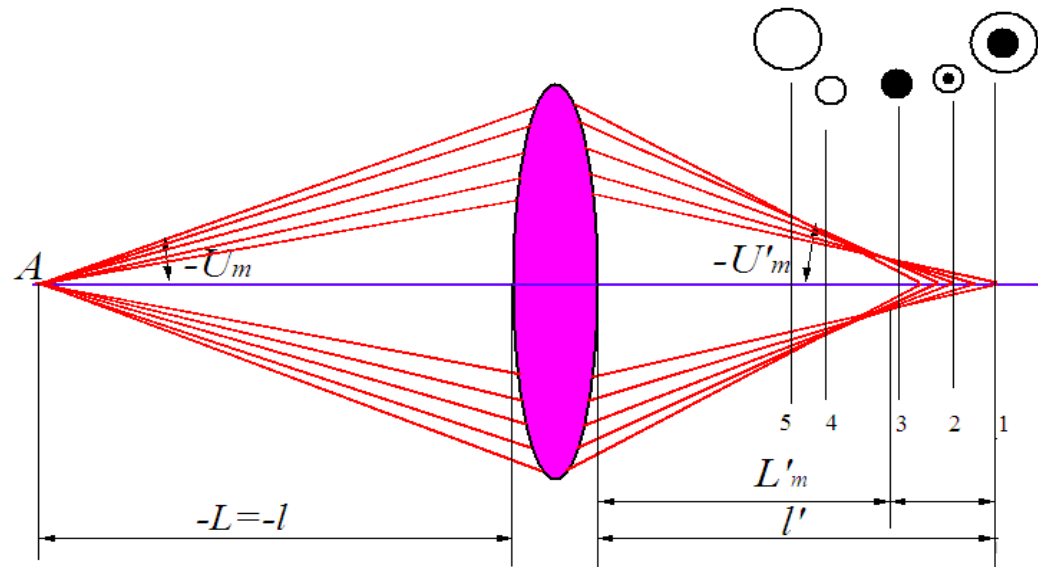
该物镜的像质是否达到要求？是否可用？



10.2 波像差与几何像差的关系

一. 轴上点波像差

- 球差和波像差是以高斯像点为参考点，即相对于以它为中心的理想波面求得的；
- 实际波面的形状由球差确定后，可以找到一个**参考点**，使得以该点为中心做的相切于实际波面中心的理想参考面与实际波面更加接近，波像差随之减小；
- 波像差是随着参考点位置而变换的。比如边缘处波像差最大，移动参考面（接收面）则球差将会改变，波像差也会随之改变。这样沿轴方向求取最佳焦点的做法，称为**轴向离焦 (axial defocusing)**。





10.2 波像差与几何像差的关系

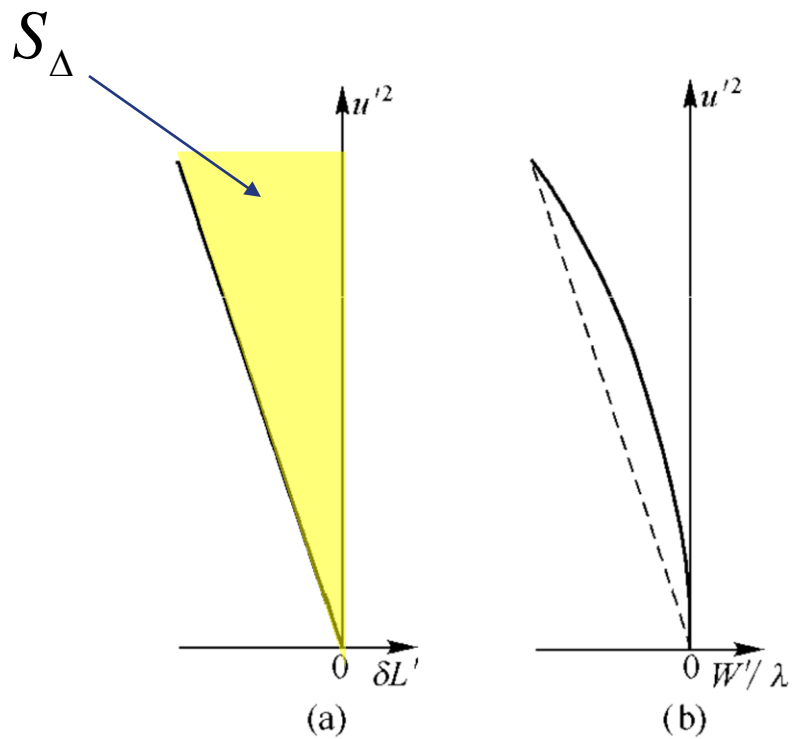
一. 轴上点波像差

当仅有初级像差时:

$$\delta L' = bu'^2$$

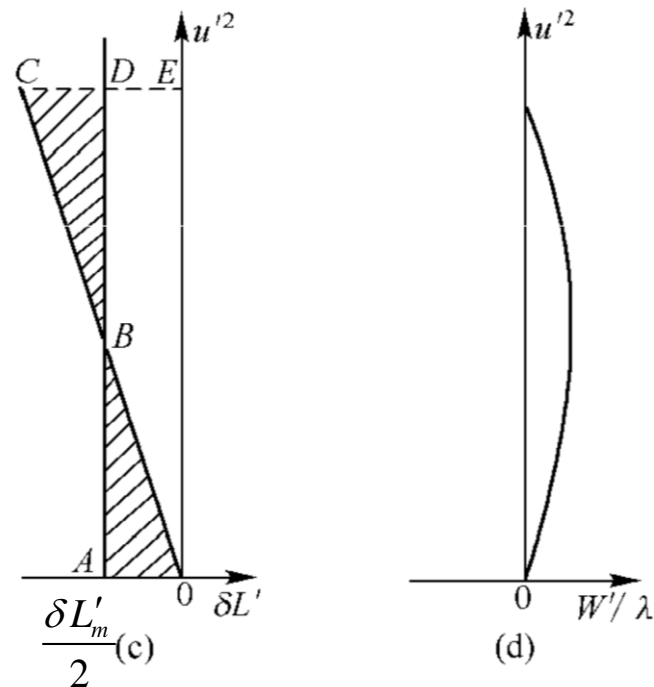
$$W_{\max} = \frac{n'}{2} S_{\Delta} = \frac{n'}{4} \delta L'_m u_m'^2$$

$$\begin{aligned} W_{\max} &= \frac{n'}{2} \times \frac{1}{2} \frac{\delta L'_m}{2} \times \frac{u_m'^2}{2} \\ &= \frac{n'}{16} \delta L'_m u_m'^2 \end{aligned}$$



不离焦时高斯面上波像差比较大

$$W_{\max} = \frac{n'}{4} \delta L'_m u_m'^2$$



离焦时高斯面上波像差改变, 在某点达到最优

$$W_{\max} = \frac{n'}{16} \delta L'_m u_m'^2$$



10.2 波像差与几何像差的关系

一. 轴上点波像差

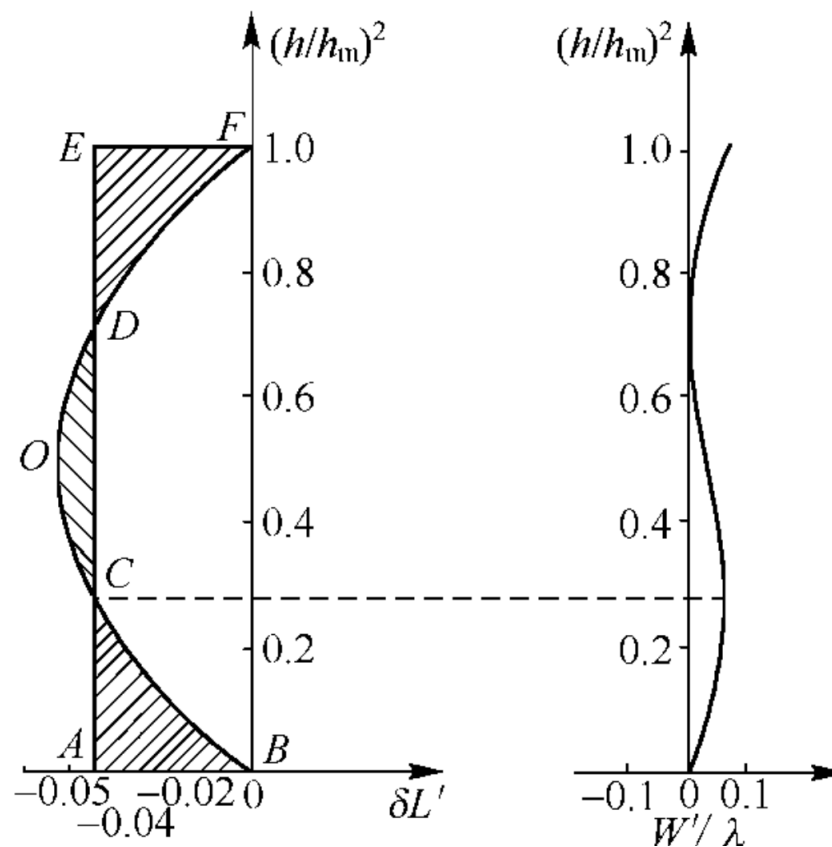
当有初级像差和二级球差时：

$$\delta L' = A_1 h^2 + A_2 h^4 \quad W = \frac{n' h_m^2}{2 f'^2} \int_0^1 \delta L' d \left(\frac{h}{h_m} \right)^2$$

- 当对边光校正球差时，0.707带光具有最大剩余球差；
- 若离焦，使得图中三部分面积相同，则应轴向离焦 $3\delta L'_{0.707} / 4$ 。

$$W_{\max} = \frac{n' h_m^2}{2 f'^2} S_{\Delta OAB} = \frac{n' h_m^2}{2 f'^2} \frac{1}{12} \delta L'_{0.707}$$

例：p154通过计算可知满足瑞利判据



当包含三级球差及以上呢？



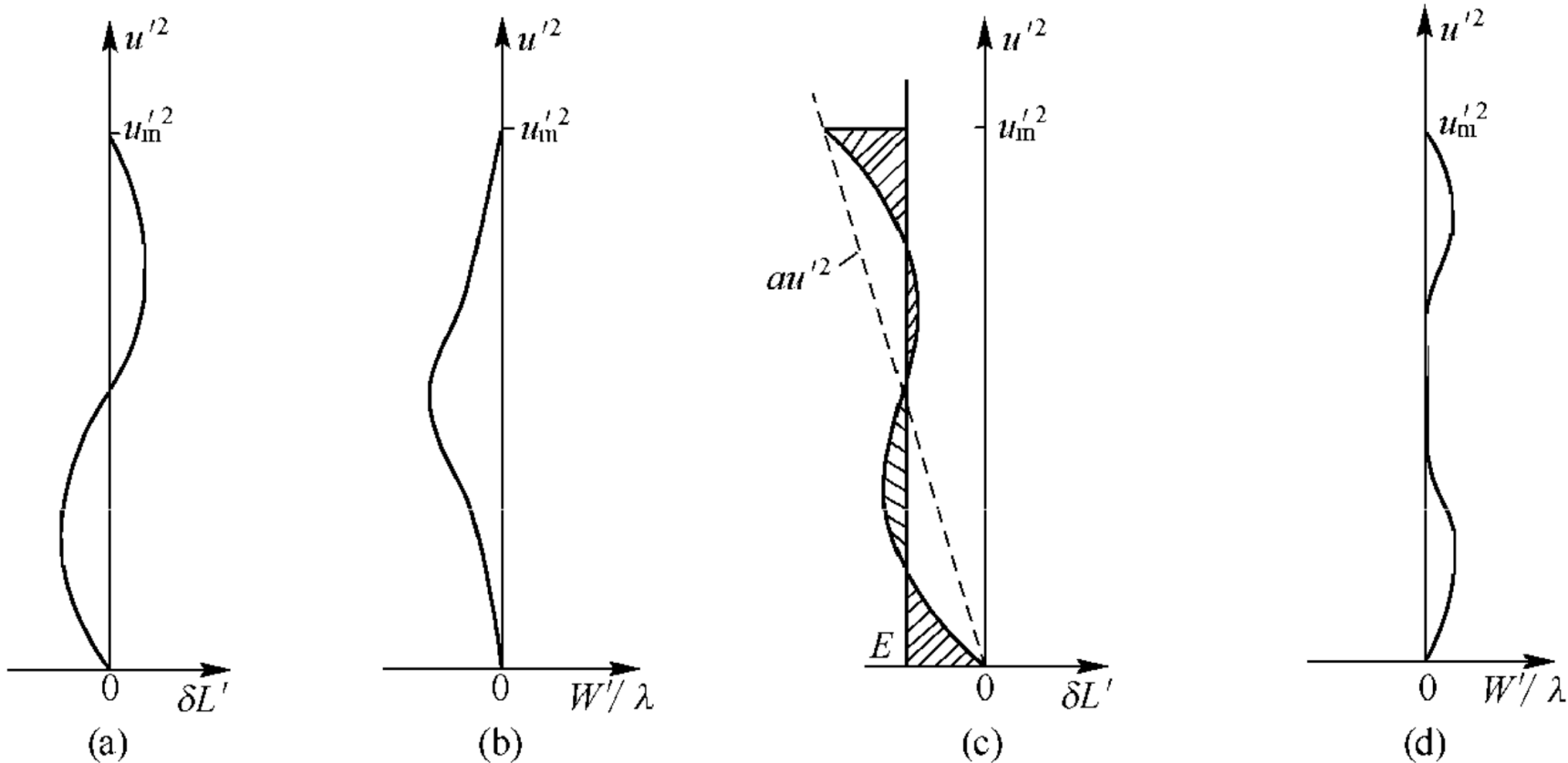


10.2 波像差与几何像差的关系

一. 轴上点波像差

当有三级及以上球差，则像差平衡的原则就是：尽可能离焦后有多多个大小相等、符号相反的小面积。

波像差优化处理示意图。





10.2 波像差与几何像差的关系

二. 轴外点波像差

- 轴外点光束经过系统后，失去轴对称性；
- **轴外点的波像差**可以表示成垂轴像差的子午分量和弧矢分量之间的关系；

10.2 波像差与几何像差的关系

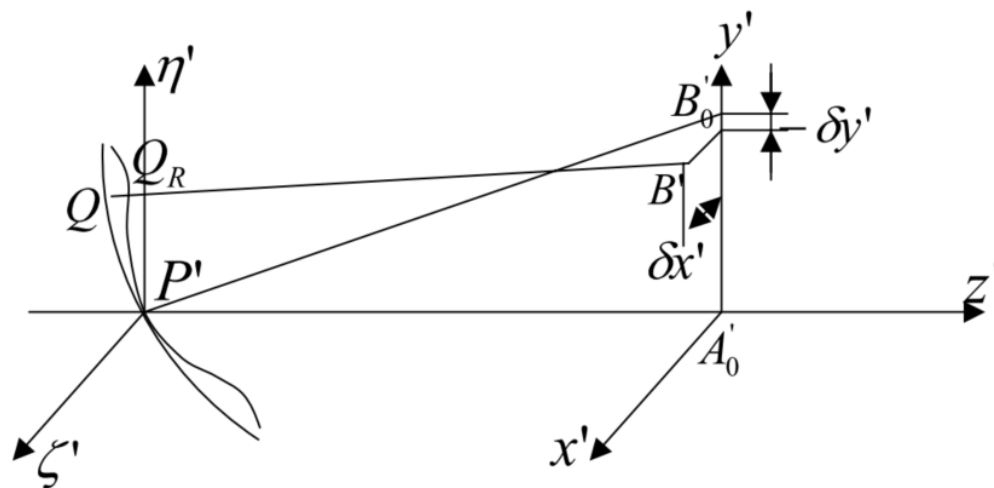
二. 轴外点波像差

Q 和 Q_R 代所在的面表示的是实际波面和理想波面。因此：

$$QQ_R = -W / n'$$

$$W = \frac{n'}{R} (\delta y' \cdot d\eta' + \delta x' \cdot d\zeta')$$

轴外点波像差与垂轴几何像差之间的关系式，利用该式可由几何像差求知波像差。



- 改变垂轴像差也可以引起波像差的变化，因此可以选择使波像差更小的参考点，即**垂轴离焦**的概念；
- 垂轴离焦的目的只是为了获得最佳参考点位置后，估计波像差大小以判断该像点的像质是否良好。



10.2 波像差与几何像差的关系

二. 轴外点波像差

离焦：垂轴离焦是否与沿轴离焦相似？



垂轴离焦：对各条光线均改变同样的值，相当于坐标平移；

沿轴离焦：纵轴转一角度，以形成尽可能相等的符号相反的小面积；

目的不同：垂轴离焦只是为了评价像质，轴向离焦为了确定最佳像面位置；

轴向离焦只能针对某一视场而言，不同的视场有不同的沿轴离焦要求，不能同时满足；

轴向离焦中，轴上和轴外不能同时满足，只能寻求最佳平衡。



10.2 波像差与几何像差的关系

三. 参考点移动引起的波像差



- 参考点的移位，导致波像差变化，可以认为是参考点的移动产生了新的波像差；
- 对于几何像差而言，参考点移动只是相当于坐标原点的变化；
- 对于波像差而言，相当于参考球面的半径发生变化，使得新的参考球面与原来的参考球面有所偏离。



10.2 波像差与几何像差的关系

三. 参考点移动引起的波像差

轴向离焦：

$$W = \int dW = \frac{n'}{2} \int_0^{u'_m} \delta L' du'^2 \quad \longrightarrow \quad \Delta W = \frac{n'}{2} \int_0^{u'_m} \Delta l' du'^2 = \frac{n'}{2} \Delta l' u'_m{}^2$$

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 。若满足：

$$\Delta W_{\text{新}} \leq \frac{\lambda}{4}$$

则可认为该系统仍旧为理想系统，这时候的焦深为 $2\Delta l'$ ，则有：

$$2\Delta l' \leq \frac{\lambda}{n' u'_m{}^2}$$

焦深与像方孔径有关。像方孔径大则焦深小。



第十章 波像差

实际光学系统成像质量是像差的综合影响，各种像差之间具有很强的相关性，因此，必须考虑像差的最佳校正方案，并根据系统的使用要求和使用状况给出合理的像差，与这些像质评价问题相关的是光学系统的**波像差**。

主要内容

- 10.1 波像差概念
- 10.2 波像差与几何像差的关系
- 10.3 色差的波像差表示
- 10.4 光学系统的像差容限
- 10.5 像质评价方法



10.3 色差的波像差表示

一. 波色差

物点发出的球面波是复色的，光学系统的消色差谱线的两种色光波面经过系统后，因各自的像差而由不同程度的变形，此时两种色光波面间的偏离量。例如F光和C光，用来表示色差，称为**波色差**：

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

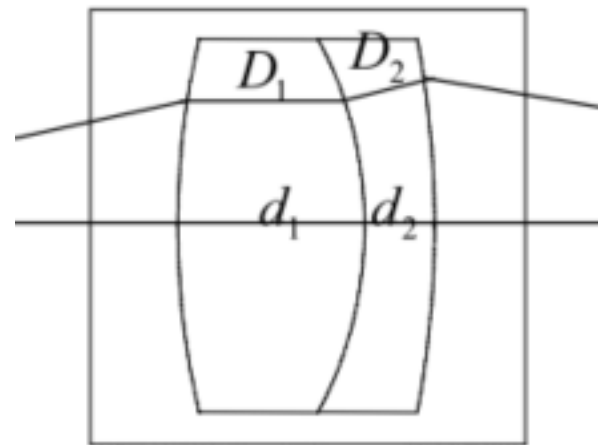


10.3 色差的波像差表示

一. 波色差

$W_{FC} = W_F - W_C$ 一孔径带的光线与近轴光线的光程之差。

$$W = \sum Dn - \sum dn$$



- 轴上点发出的某一光线与沿轴光线之间的光路差；
- D 表示光线在相应光学元件中的光路长度；
- d 表示光学系统中各光学元件沿光轴的厚度；

$$\begin{aligned} W_{FC} &= \left[\sum D_F n_F - \sum dn_F \right] - \left[\sum D_C n_C - \sum dn_C \right] \\ &= \sum (D_F n_F - D_C n_C) - \sum d (n_F - n_C) \end{aligned}$$

$$\approx \sum D_D (n_F - n_C) - \sum d (n_F - n_C) = \sum (D - d) dn$$

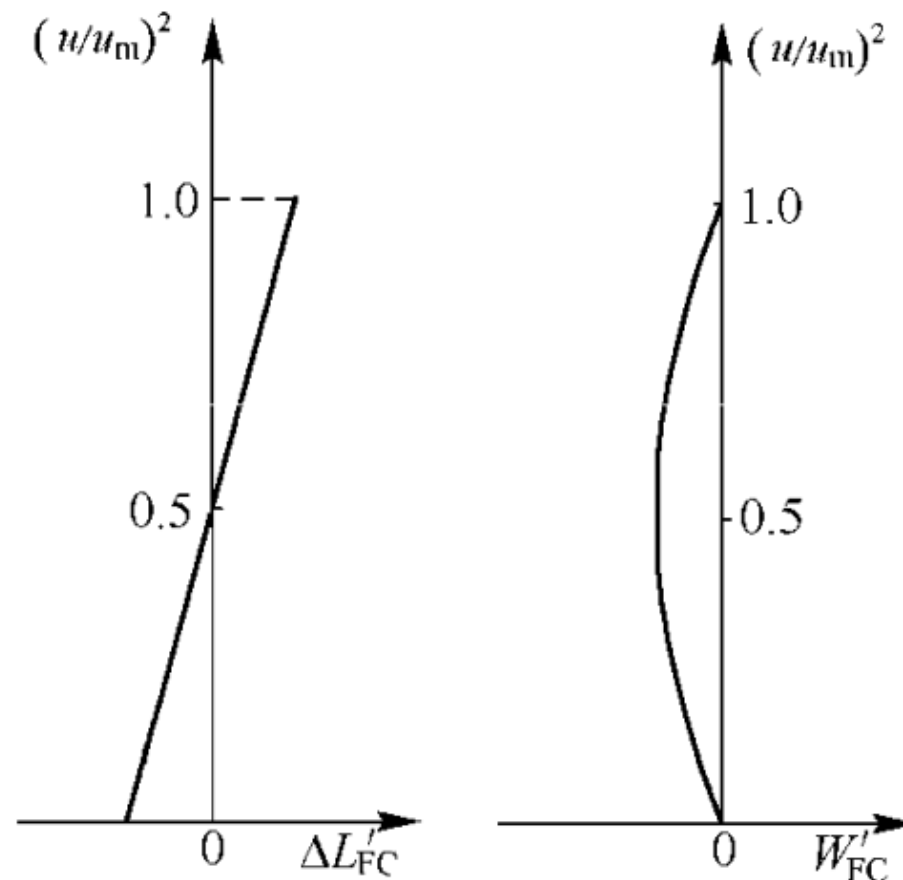
轴上点波色差的表示式



10.3 色差的波像差表示

二. 色球差

- 光学系统使二色波面在孔径边缘相交而对边缘带校正波色差，即
$$W_{FC} = \sum (D - d) dn = 0$$
- 由于二色波面相对于参考球面的偏离程度不同，在中间各带仍会有剩余的波色差存在。
- 由于各色光线的球差各不相同而引起的，称为**色球差**；





10.3 色差的波像差表示

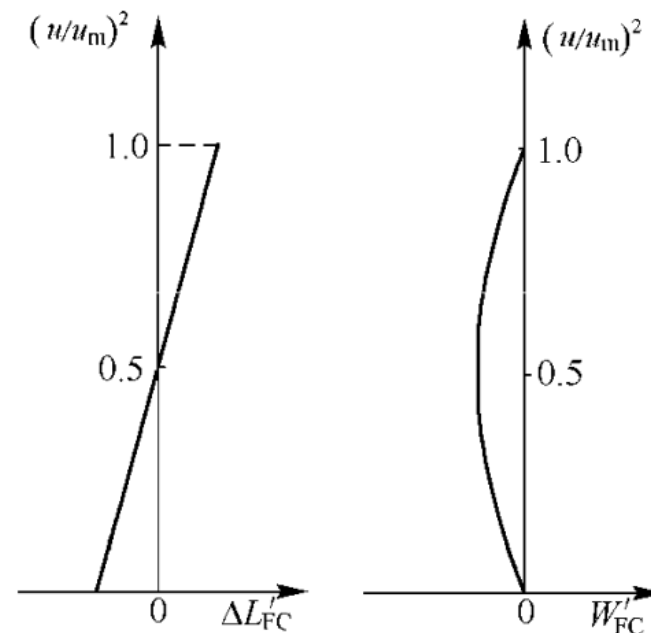
三. 几何色差与波色差的关系

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

校正色差要求: $\delta L'_{ch0.707} = 0$

$$\delta L'_{chM} = -\delta L'_{ch} = -a_0$$

$$\delta L'_{ch0.707} = 0 \longleftrightarrow W_{FCm} = 0$$



- 绝大多数系统几何色差与孔径的平方成比例;
- 因为在对一个带校正色差后, 总希望在其它带上的剩余色差最小, 在0.707带正可以达到这个目的。



第十章 波像差

实际光学系统成像质量是像差的综合影响，各种像差之间具有很强的相关性，因此，必须考虑像差的最佳校正方案，并根据系统的使用要求和使用状况给出合理的像差，与这些像质评价问题相关的是光学系统的**波像差**。

主要内容

- 10.1 波像差概念
- 10.2 波像差与几何像差的关系
- 10.3 色差的波像差表示
- 10.4 光学系统的像差容限
- 10.5 像质评价方法



10.4 光学系统的像差容限

- 光学系统不可能把像差完全校正，同时也没有必要校正的尽善尽美，因为接收器也是有缺陷的；
- 光学系统的成像质量是各种像差综合影响的结果，光学系统的像质要求还随系统的使用条件、使用要求和接收器性能等的不同而不同；



典型光学系统



光学系统中多大的像差能被认为是允许的 ？





10.4 光学系统的像差容限

一. 小像差系统

- 每一种像质评价方法都有其局限性，并不适用于所有的光学系统；
- 以最大波像差为评价依据的**瑞利判据**适用于小像差系统，比如望远镜和显微镜等；

- **瑞利判据：**

最大剩余波像差 $\leq \lambda / 4$

球差： ● 近轴区域，仅有初级球差，所产生的最大波像差小于或等于1/4波长

$$W_{\max} = \frac{n'}{16} \delta L'_m u_m'^2 \leq \frac{\lambda}{4} \quad \longrightarrow \quad \delta L'_m \leq \frac{4\lambda}{n u_m'^2} = 4 \text{倍焦深} \quad \delta L'_m \leq \frac{4\lambda}{n' \sin^2 U'_m}$$



10.4 光学系统的像差容限

一. 小像差系统

球差： ● 系统包括初级和二级球差，在对边光校正球差后，0.707 带的光线具有最大的剩余球差

$$\delta L'_{0.707} \leq 6 \text{倍焦深} \quad \longrightarrow \quad \delta L'_{0.707} \leq \frac{6\lambda}{n' \sin^2 U'_m}$$

弧矢彗差： $K_s \leq \frac{\lambda}{2n' \sin U'_m}$

正弦差： $OSC \leq \frac{\lambda}{2n'y'_0 \sin U'_m}$

像散： $\Delta x' \leq \frac{\lambda}{n' \sin U'_m} = 1 \text{倍焦深}$

像面弯曲： 人眼调节范围内

畸变（要求平场）： $\frac{\delta y'}{y'_0} \leq 5 \sim 10\%$



10.4 光学系统的像差容限

二. 大像差系统

- 大像差系统如照相物镜，应该校正全部像差；
- 该种系统所具有的各种像差的剩余值，要超出瑞利极限倍，不能用瑞利判断来评价其像质；
- 一般用像点的弥散斑来直接评定。
- **弥散斑直径：** $\leq 0.01 \sim 0.1 \text{mm}$
- **畸变：** 以观察者看不出像的明显变形即可2%~4%。





第十章 波像差

实际光学系统成像质量是像差的综合影响，各种像差之间具有很强的相关性，因此，必须考虑像差的最佳校正方案，并根据系统的使用要求和使用状况给出合理的像差，与这些像质评价问题相关的是光学系统的**波像差**。

主要内容

- 10.1 波像差概念
- 10.2 波像差与几何像差的关系
- 10.3 色差的波像差表示
- 10.4 光学系统的像差容限
- 10.5 像质评价方法



10.5 像质评价方法

- ❖ 成像光学系统必须校正光学系统的像差，但是既不可能也无必要把像差校正到完全理想的程度；
- ❖ 需要选择像差的最佳校正方案，也需要确定校正到怎样的程度才能满足使用要求，即确定像差容限。

像质评价方法

空间域方法

物体看做是发光点的集合，以一点成像的能量集中程度表征光学系统成像质量。

斯特列尔判断

瑞利判读

分辨率

点列图

空间频域方法

—— 光学传递函数

物体的亮度分布函数展开为傅里叶级数，光学系统的特性表现为它对各种频率的正弦光栅的传递和反应能力。



10.5 像质评价方法

一. 斯特列尔(Strehl)判断 p298

- 1894年提出的判断小像差光学系统像质的标准。
- 光学系统有像差时，衍射图样中心亮斑（艾里斑）占有的光强度要比理想成像时有所下降，两者的光强度之比称为斯特列尔强度比（Strehl Ratio）；

斯特列尔判断：中心点亮度(S. D.)大于或等于0.8时，系统是完善的。评价小像差系统成像质量的比较严格可靠的方法。

- **小像差光学系统**中心点亮度与波像差之间关系比较简单；
- 但是中心点亮度计算起来比较复杂，需要基于基尔霍夫衍射方程，不便于实际应用



10.5 像质评价方法

二. 瑞利判断

- 1879年瑞利Rayleigh在观察光谱仪成像质量时提出的简单判断；
- **瑞利判断**：实际波面与参考球面之间的**最大偏离量**，即波像差**不超过1/4波长**，该实际波面可以认为是无缺陷的。
- 不够严密，只考虑了波像差的最大值，而没有考虑波面上缺陷部分在整个面积中所占的比重；
- 波像差随着参考球面或者参考点的选择而异，并且在最佳参考点时，波像差最大值的数值大小还随像差的平衡方案而异，因此瑞利判断最为评价指标时，应该寻求**与之相应的像差最佳平衡方案**。



10.5 像质评价方法

二. 瑞利判断

- **瑞利判断优点：** 便于实际应用，因为波像差与几何像差之间的关系比较简单，易于计算；
- **另一优点：** 就是对通光孔不必做任何假定，只要计算波像差曲线，便可评价；
- 瑞利的波像差小于 $1/4$ 波长与斯特列尔的中心点亮度 ≥ 0.8 的判据是一致的。

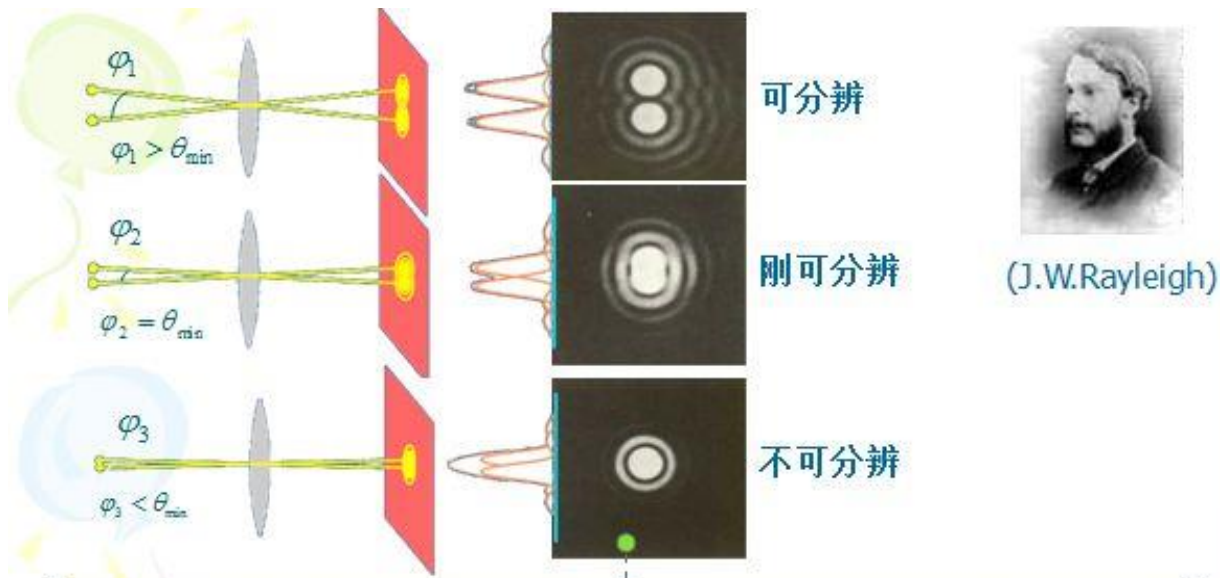
点像的衍射图样中光能分布情况

波像差	0	$\lambda/16$	$\lambda/8$	$\lambda/4$
中心光斑所占能量	84	83	80	68
S.D.	1.0	0.99	0.95	0.81

三. 分辨率

光学系统分辨率 (resolution): 能被光学系统分辨开的两个物点 (或像点) 之间的最小距离;

瑞利判据



可分辨

刚可分辨

不可分辨

(J.W. Rayleigh)

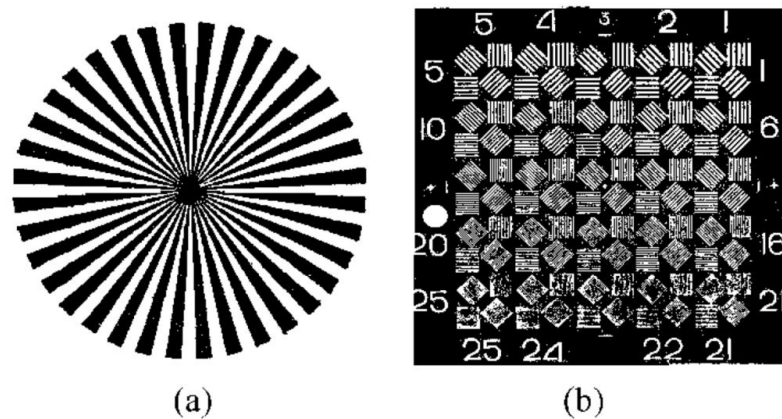
瑞利判据: 对于两个相等光强的非相干物点, 如果其一个像斑的中心恰好落在另一像斑的边缘 (第一暗纹处), 则此两物点被认为是刚刚可以分辨。

两像斑中心角距离为最小分辨角: $\theta_{\min} = \theta_0 \approx 1.22 \frac{\lambda}{D}$

三. 分辨率

分辨率作为成像质量指标并不是一种完善的方法

- 小像差系统的实际分辨率几乎只与入瞳直径或数值孔径有关，受像差影响很小；
- 像差主要导致能量分散，直接影响线条的**清晰度**，对分辨率的影响则并不显著；
- 分辨率是一个不是很确定的量，对同一个光学系统而言，随着测试条件的不同，结果也不相同；
- 对于大像差系统，当用低对比分辨率板来检验时，检验结果是与像质相一致的。



大像差系统像质评价的分辨率板示意图

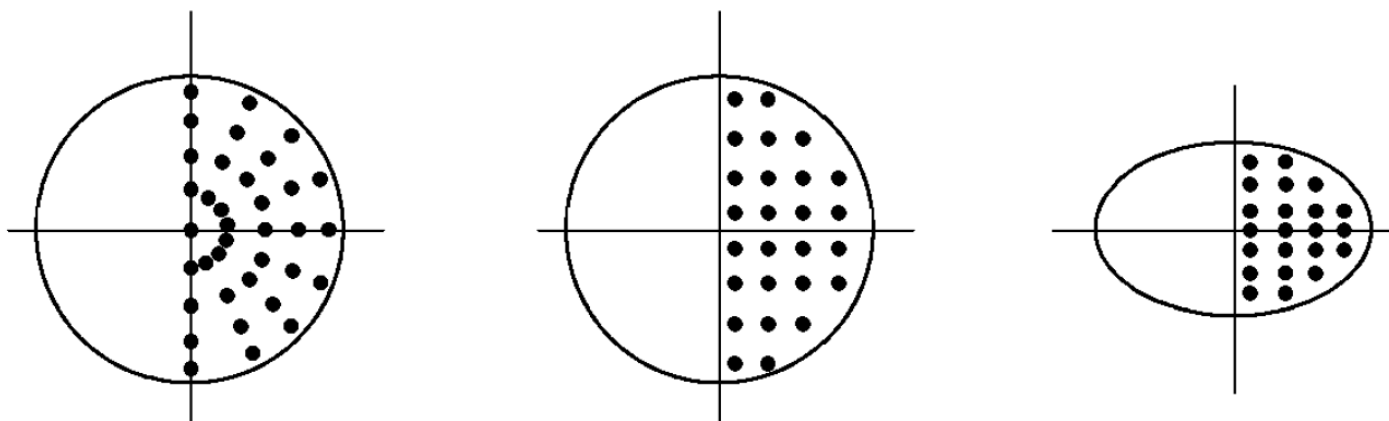


10.5 像质评价方法

四. 点列图

点列图：由一点发出的许多光线经光学系统后，因像差使其与像面的交点不在集中于同一点，形成了一个散布在一定范围的弥散图形，称为**点列图** (spot diagram)；

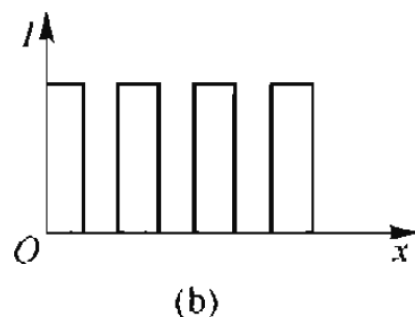
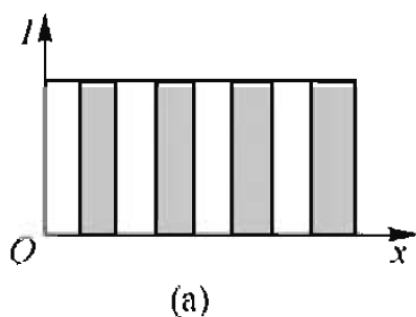
- 点列图中点的密集程度可以衡量系统成像质量的优劣；
- 点列图只能适用于大像差系统，主要是照相物镜；



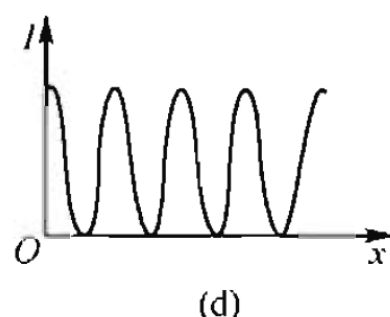
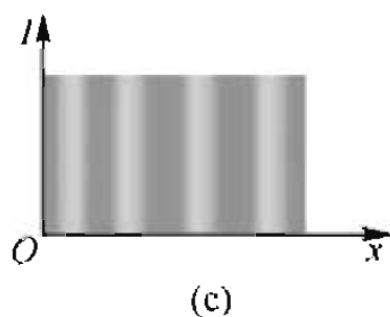
入瞳上选取光线坐标方法的示意图

五. 光学传递函数

分辨率分划板：矩形光栅



光学传递函数分划板：正弦波光栅



光学传递函数所用分划板图案原理示意图

- 光学传递函数中，正弦波光栅是沿着某个长度方向（空间）的光亮度变化，这种正弦波称为**空间波**，单位距离内的空间周期 T 称为**空间频率**, ν ；
- 空间频率可看做是每毫米内包含的亮线条或暗线条的条数，相邻的亮和暗线条称为一个“线对”，单位为lp/mm

● **空间频率：** $\nu = 1 / T$

● **空间圆频率：** $\omega = 2\pi\nu = 2\pi / T$



10.5 像质评价方法

五. 光学传递函数

描述线条的明暗对比程度定义对比度 M :

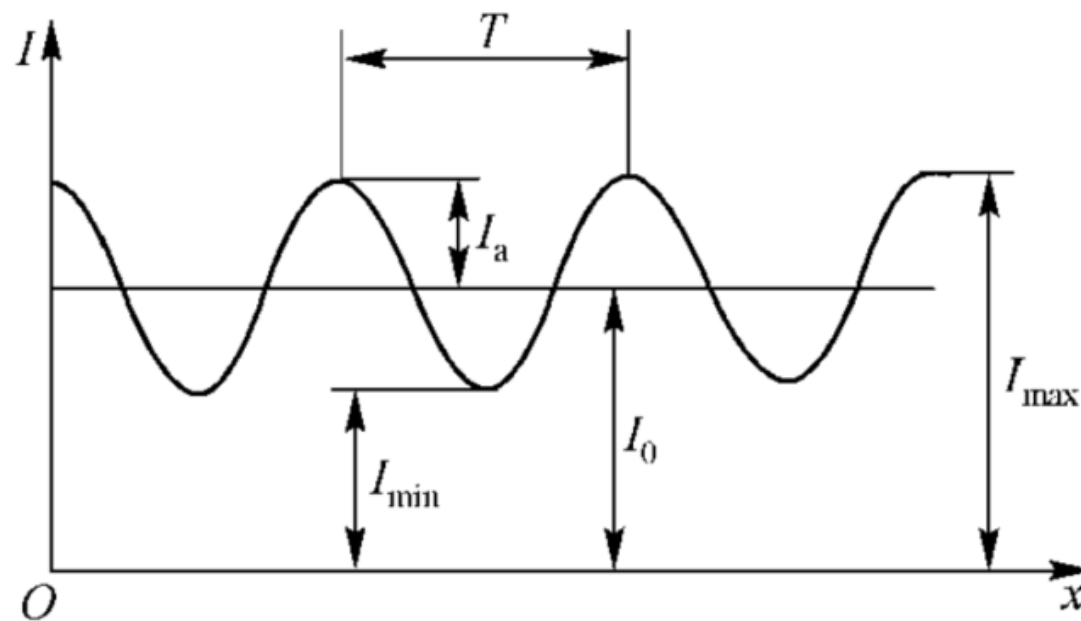
$$M = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}$$

对比度也称为**反衬度或反差**，又叫做**调制度**。

具体表示为：

$$\begin{aligned} I(x) &= I_0 + I_a \cos(2\pi\nu x) \\ &= I_0 [1 + M \cos(2\pi\nu x)] \end{aligned}$$

令 $I_0 = 1$, 可以简化为: $I(x) = 1 + M \cos(2\pi\nu x)$



正弦光栅光亮度分布示意图

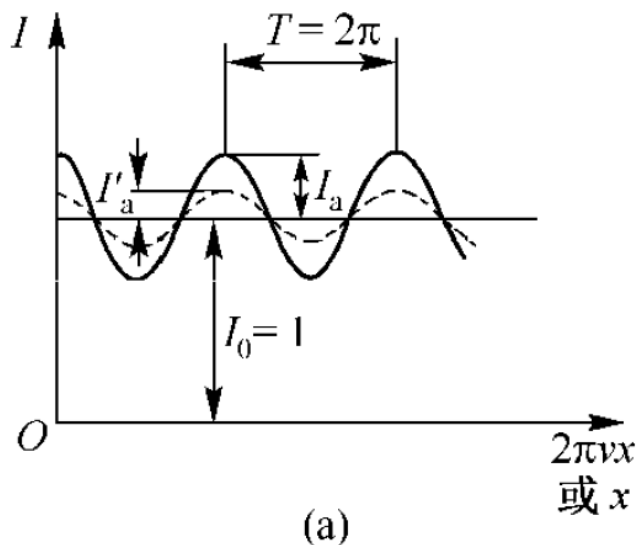
$$0 \leq M = \frac{I_a}{I_0} \leq 1$$



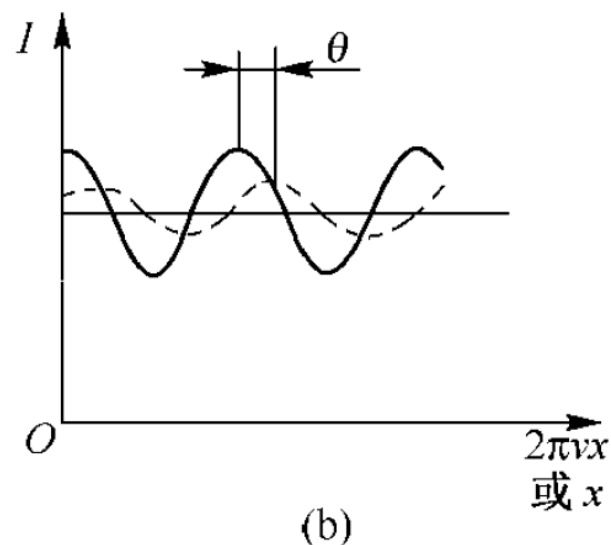
10.5 像质评价方法

五. 光学传递函数

<https://www.microscopyu.com/microscopy-basics/modulation-transfer-function>



光学传递
函数定义



$$I(x) = 1 + M(\nu) \cos(2\pi\nu x) \xrightarrow{\text{光学系统}} I(x) = 1 + M'(\nu) \cos[2\pi\nu x - \theta(\nu)]$$

光学传递函数:
$$OTF(\nu) = T(\nu) e^{-j\theta(\nu)} = \frac{M'(\nu)}{M(\nu)} e^{-j\theta(\nu)}$$

调制传递函数 MTF: 对比度传递函数 (CTF)

相位传递函数 PTF:



10.5 像质评价方法

五. 光学传递函数

光学传递函数是光学系统的点扩散函数的傅里叶变换。

物面分布函数

点扩散函数

$$i(x, y) = \iint o(x_0, y_0) h(x - x_0, y - y_0) dx_0 dy_0 = o * h$$

傅里叶变换

$$I(s, t) = H(s, t) \cdot O(s, t)$$

物理意义?



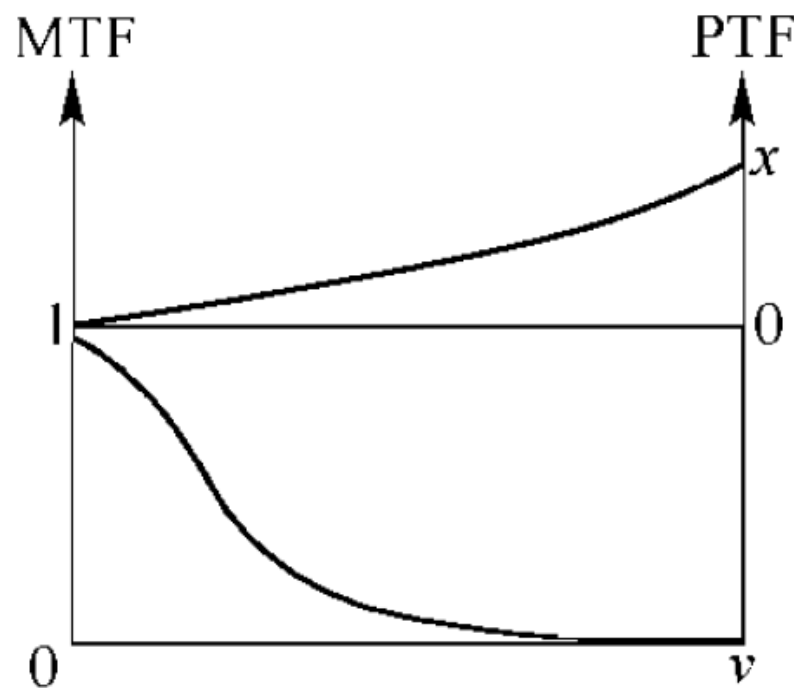
- **物理意义：** 一个任意的非相干的光强分布 $o(x, y)$ 可以看做是各种空间频率的余弦光强度分布的组合。光学系统对 $o(x, y)$ 成像的过程，就是 $o(x, y)$ 中的每一余弦分量 $O(s, t)$ 乘上一个响应的因子 $H(s, t)$ ，构成像面分布函数 $i(x, y)$ 的对应余弦分量 $I(s, t)$ ，即像 $i(x, y)$ 的谱。



10.5 像质评价方法

五. 光学传递函数

- **理想光学系统：**由于衍射的存在，点扩散函数并非是**冲激函数**，调制传递函数随空间频率的增加而降低，直到截止频率；
- **实际光学系统：**像差（畸变不影响传递函数）将使得调制传递函数随空间频率的增高比理想系统降低的更快。



- 光学传递函数是一种个比较全面、客观的评价像质的方法；
- 明确的物理意义，和使用性能相联系，可以计算和测量；
- 对于大像差和小像差系统均适用。



第十章 波像差

实际光学系统成像质量是像差的综合影响，各种像差之间具有很强的相关性，因此，必须考虑像差的最佳校正方案，并根据系统的使用要求和使用状况给出合理的像差，与这些像质评价问题相关的是光学系统的**波像差**。

主要内容

- 10.1 波像差概念
- 10.2 波像差与几何像差的关系
- 10.3 色差的波像差表示
- 10.4 光学系统的像差容限
- 10.5 像质评价方法



第十章 波像差

波像差概念

- 波像差

波像差与几何像差

- 轴上点波像差
- 轴外点波像差
- 参考点移动引起的波像差

色差的波像差表示

- 波色差
- 色球差
- 几何色差与波色差的关系

第十章 波像差

光学系统的像差容限

- 小像差系统
- 大像差系统

像质评价方法

- 斯特列尔判断
- 瑞利判断
- 分辨率与点列图
- 光学传递函数