

第二部分 像质评价

浙江大学光学工程研究所

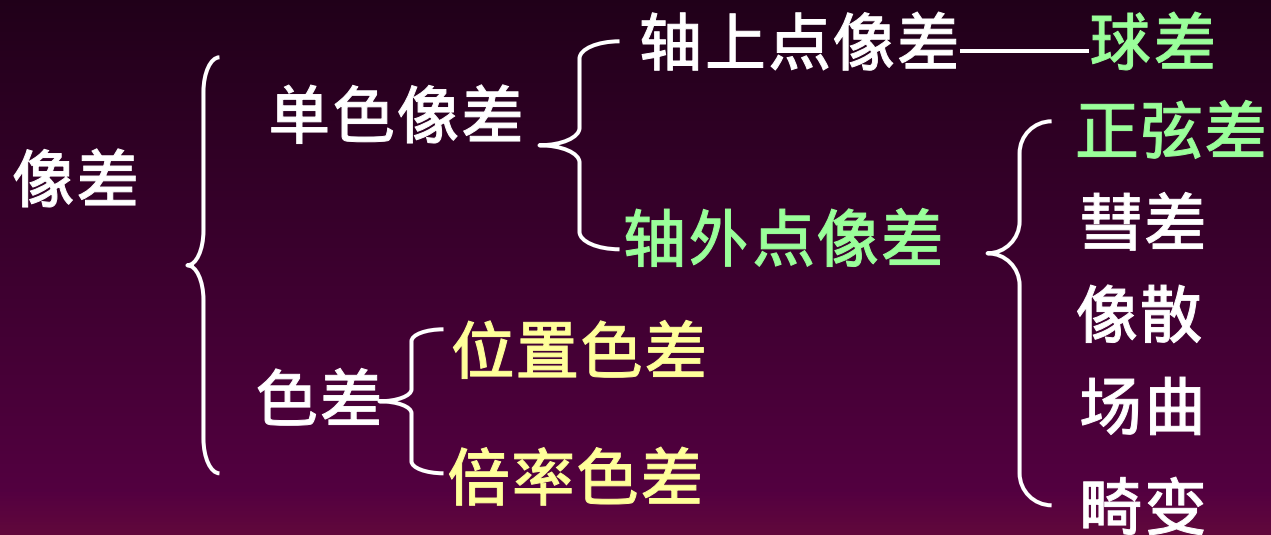
李晓彤、岑兆丰

电话、传真：0571 - 87952302

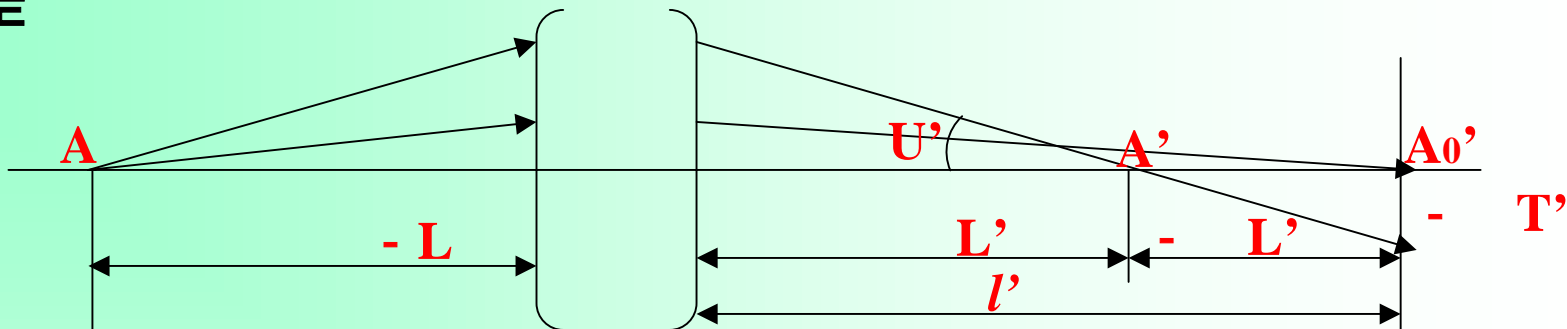
电子邮件：lixt@zju.edu.cn
cenzf@zju.edu.cn

§ 2-1 几何像差基本概念

像差——光学系统成像不完善程度的描述



一、球差

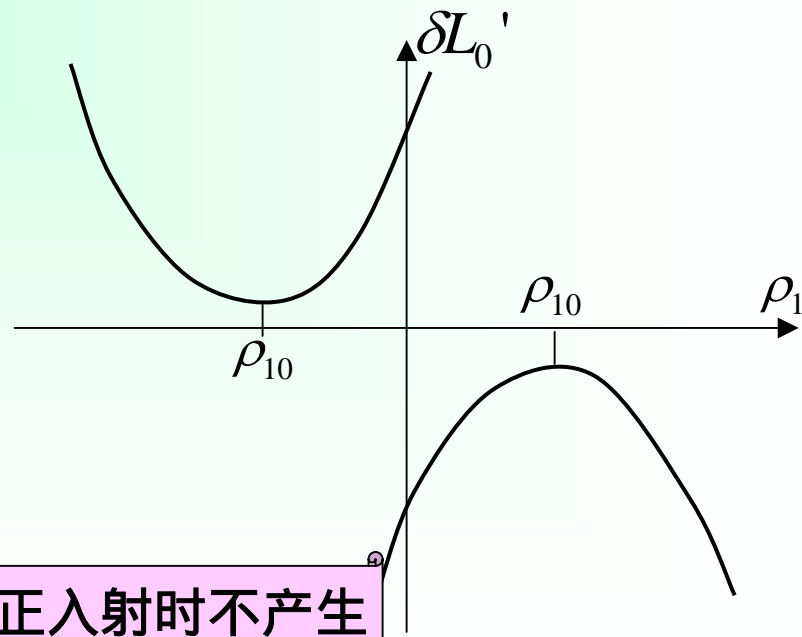


轴向球差 $\delta L' = L' - l'$

垂轴球差 $\delta T' = \delta L' \operatorname{tg} U'$

$\delta L' = 0$ 消球差 (只能对某孔径带)

正透镜恒产生负球差，负透镜恒产生正球差，当入、出射光线关于透镜对称时，球差取得极值（绝对值最小），此时的透镜形状为最小球差形状。



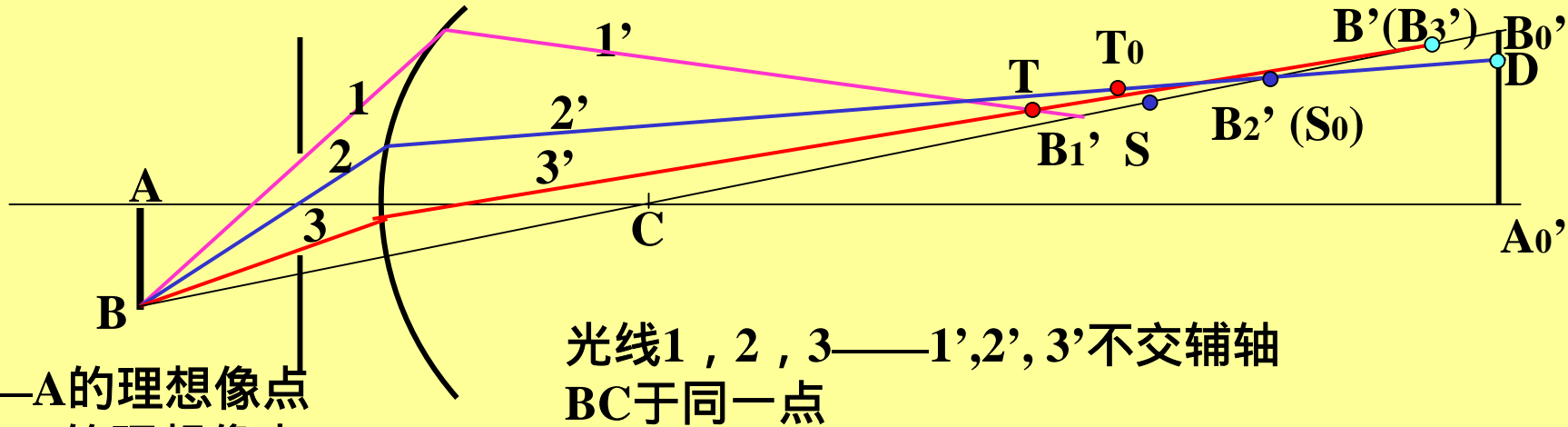
单个球面透镜不可能消球差

平行平板恒产生正球差，当且仅当平行光正入射时不产生



轴外像差

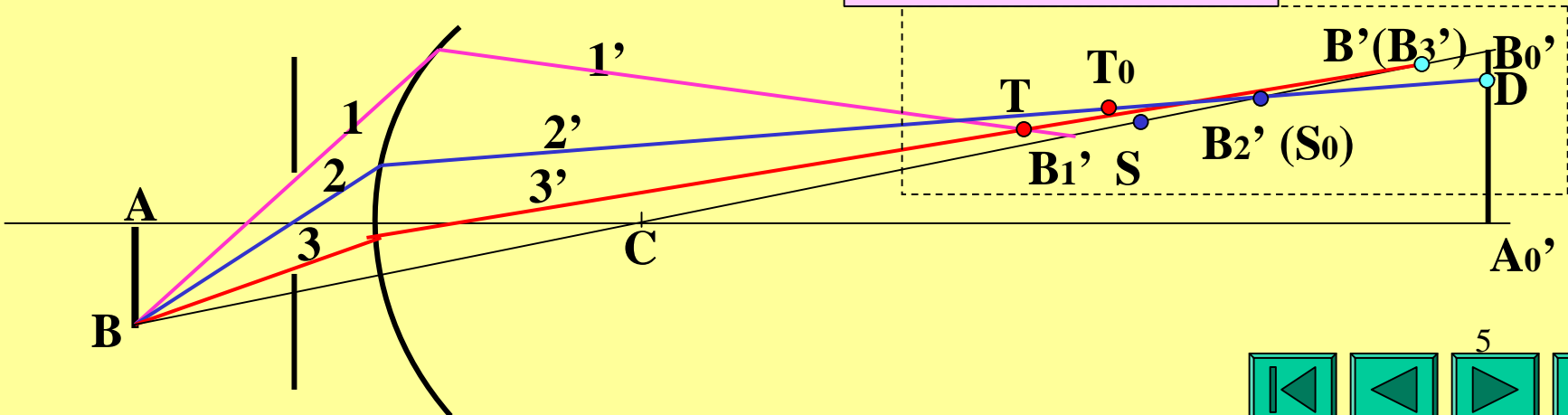
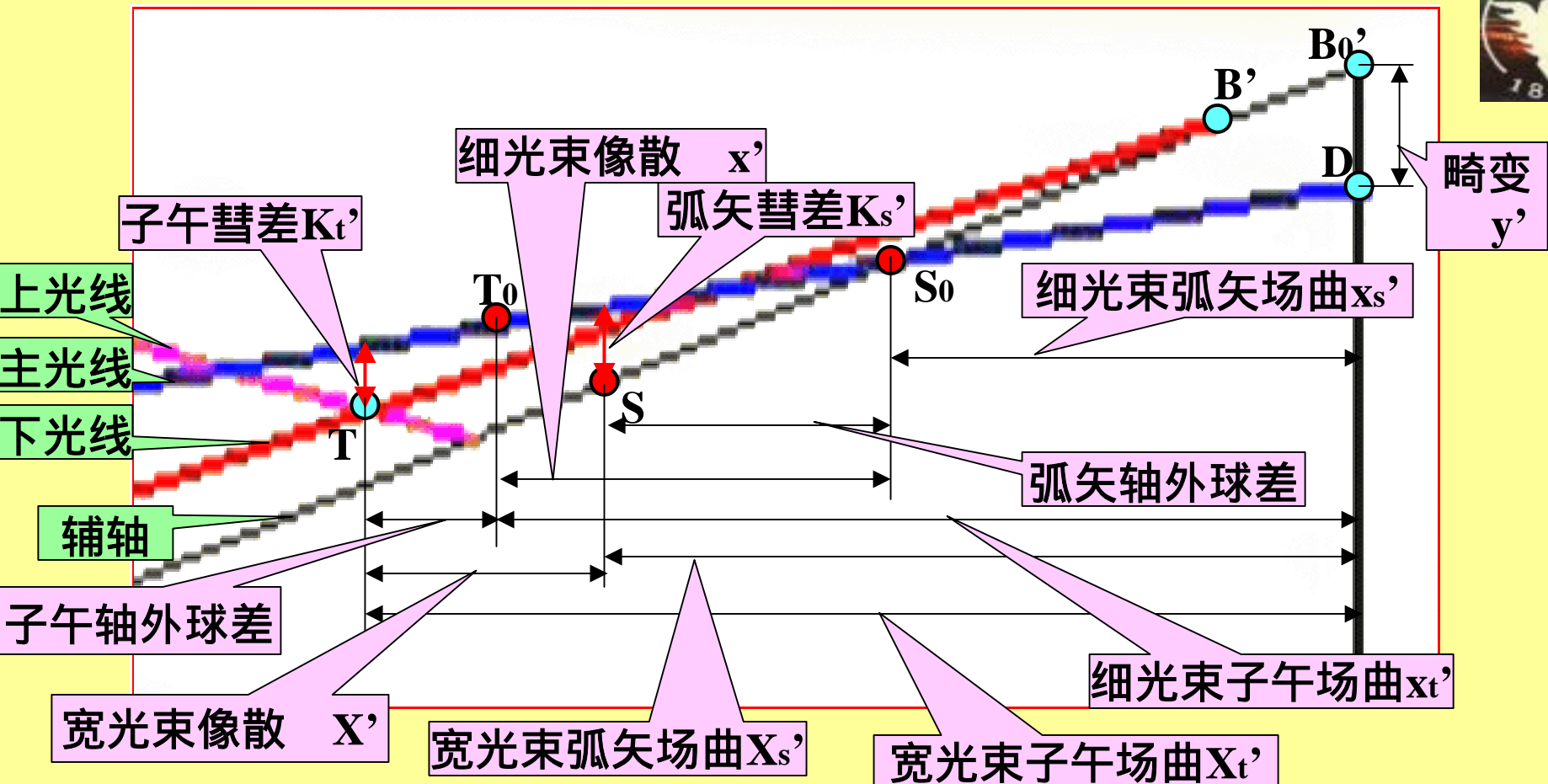
一、轴外像差概述——折射球面存在球差和像面弯曲，使轴外点衍生出一系列像差



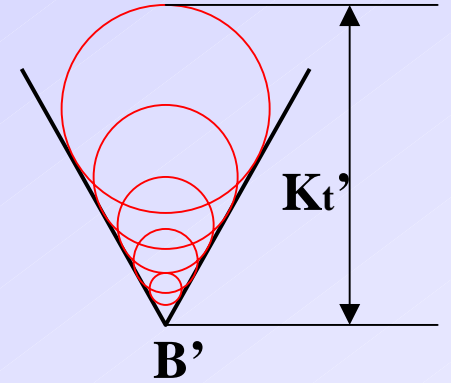
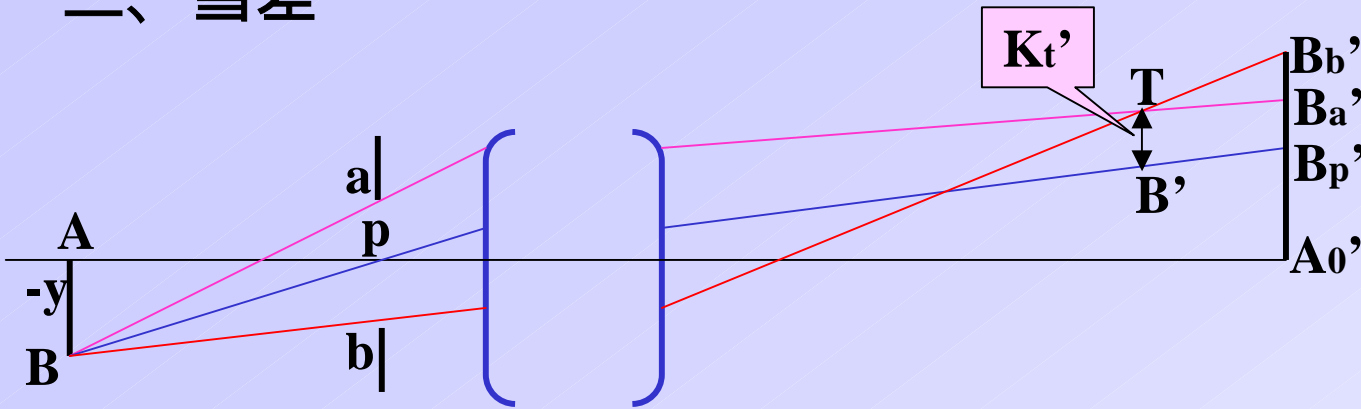
A0'——A的理想像点
B0'——B的理想像点

B'——B的近轴像点，与B0'不重合

- 宽光束 { 上下光线交点T：不在主光线上，不在辅轴上
前后光线交点S：不在主光线上，但在辅轴上
- 细光束 { T——>T0：在主光线上
S——>S0：在主光线与辅轴交点B2'上



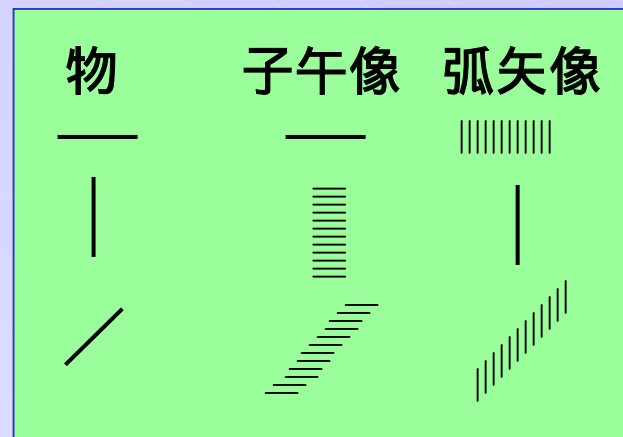
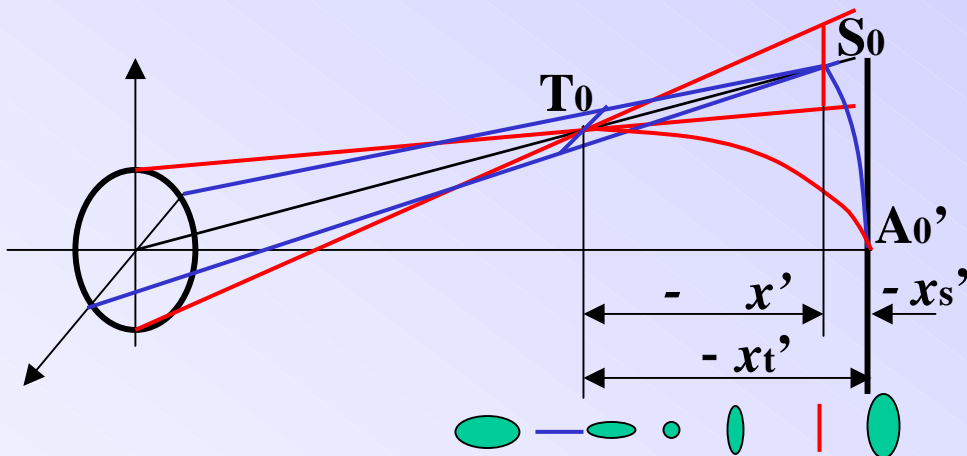
二、彗差



- 上下光线的交点偏离主光线——子午彗差
- 前后光线的交点偏离主光线——弧矢彗差

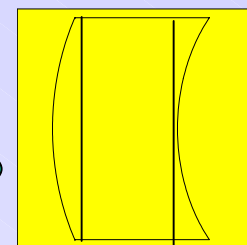
现象：仅有彗差时，将形成彗星状的弥散斑

三、像散与像面弯曲——一般指细光束



像散为零时的像面弯曲：称匹兹凡面弯曲。

正正分离对校正匹兹凡面弯曲更不利，正负分离可以校正



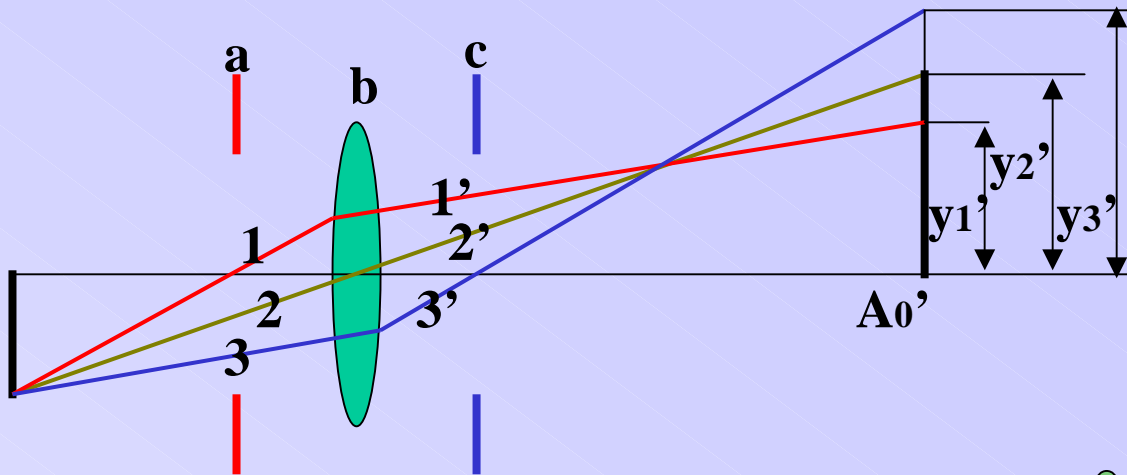
这样一块厚透镜可看成正透镜+平板+负透镜

正负光焦度的分离是校正匹兹凡和的唯一方法

四、畸变

$$y_1' \neq y_2' \neq y_3'$$

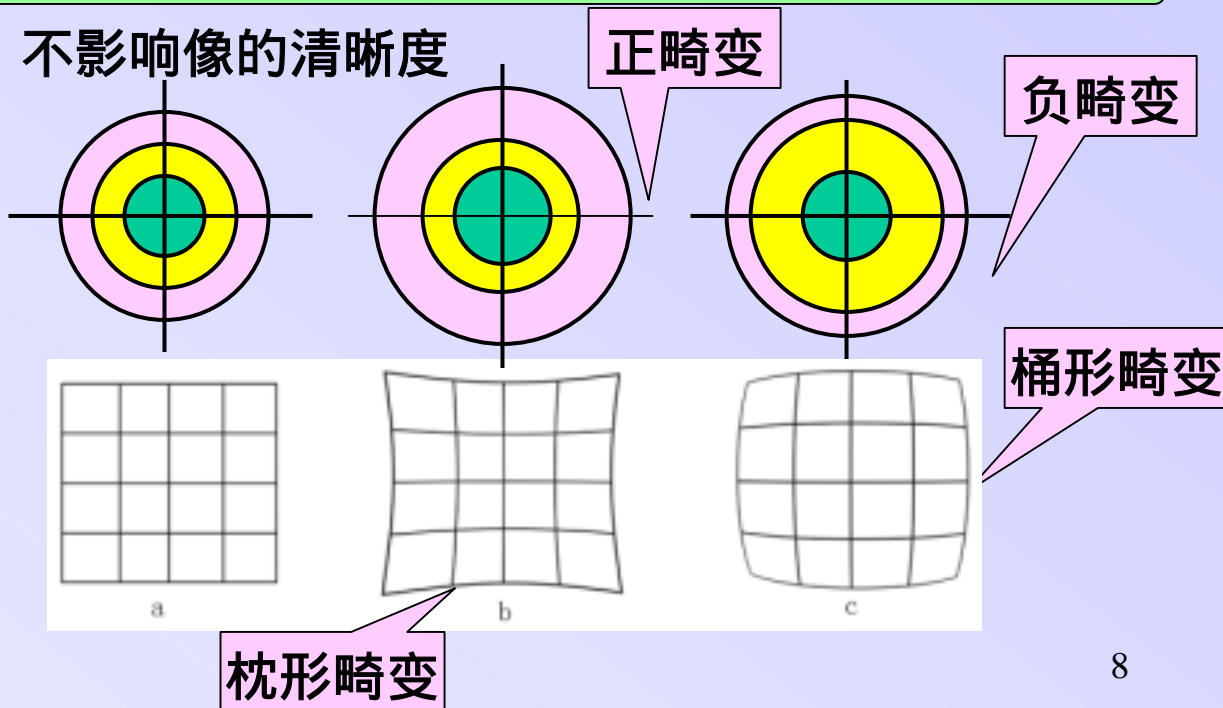
$$\beta_1 \neq \beta_2 \neq \beta_3$$



孔阑移动，主光线与高斯像面交点高度 y_p' 变，改变，像变形——畸变

现象：仅是像的变形，不影响像的清晰度

若只要求像的清晰度高，则对变形要求可降低。



相对畸变

$$\frac{\delta y_p'}{y_0'} = \frac{y_p' - y_0'}{y_0'} \times 100\% = \frac{\bar{\beta} - \beta}{\beta}$$

实际放大率与理想放大率的相对误差

1. 全对称系统（结构对称，物像对称），不产生畸变；
2. 孔阑与之重合的接触薄系统，不产生畸变（主光线通过系统中心，沿理想方向射出）；
3. 对于单薄透镜，光阑前移——负畸变，光阑后移——正畸变。
因此，畸变与光阑位置有关。

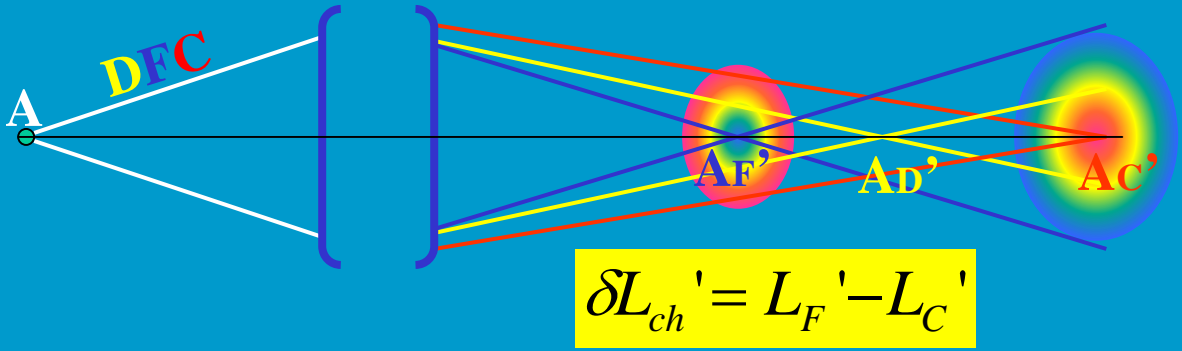


五、色差

1. 位置色差 同种材料对不同 λ 折射率 n 不同

$$n_F - n_C = 0.00806$$
$$v = \frac{n_D - 1}{n_F - n_C} = 64.1$$

对同一 l, r , 得出 l' 不同——位置色差



对复色光成像的仪器要求：
对主色光校单色像差
对成像光谱两端校色差

结论：正透镜恒产生负色差
负透镜恒产生正色差
色差大小与物距（像距）有关

平行平板恒产生正色差，
当且仅当 光束正入射时，
才不产生位置色差

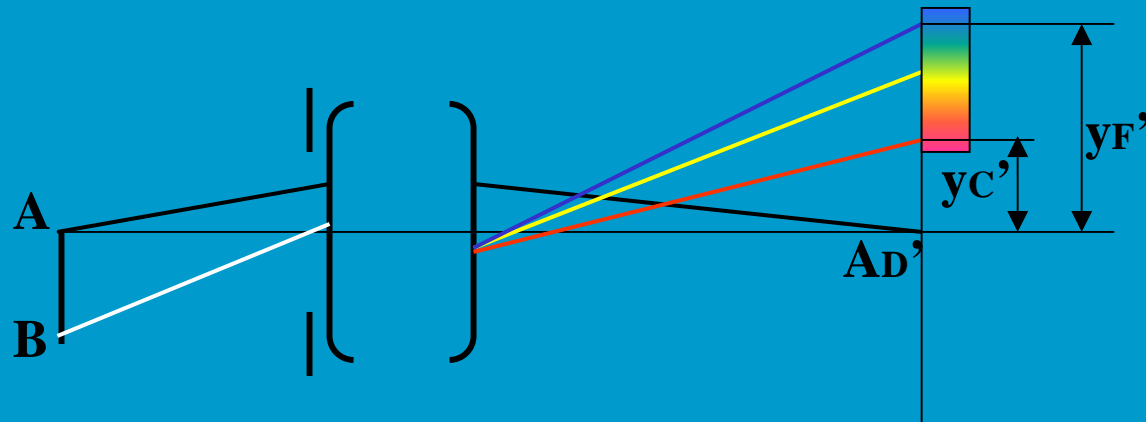
2. 倍率色差

产生与现象

λ 变 n 变 变 y' 变
在高斯像面上度量, 有

$$y_F' \neq y_C' \neq y_D'$$

倍率色差的度量 $\delta y_{ch}' = y_F' - y_C'$



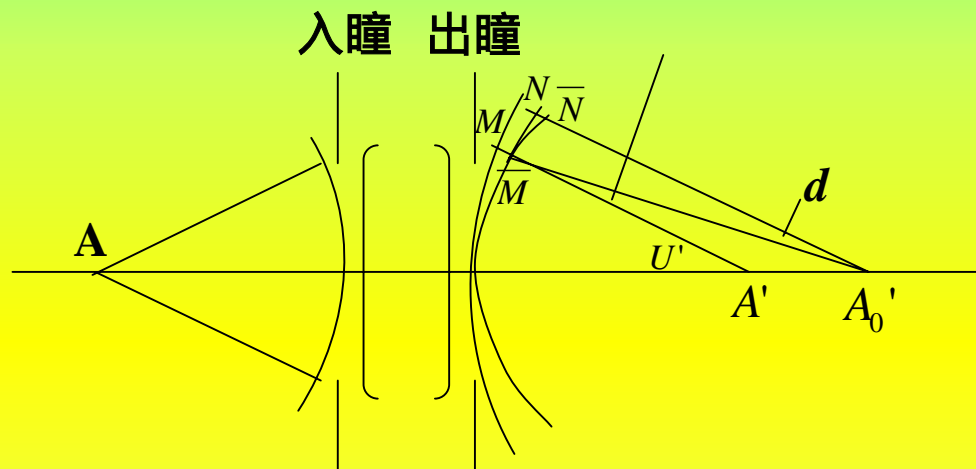
F光、C光主光线与
高斯像面的交点高度

分离透镜系统要同时校正两种色差，
必须每一镜组本身校正色差

§ 2-2 波像差

光线——波面的法线

波像差——实际波面对理想波面的偏离



§ 2-3 像差与孔径、视场的关系

球差、位置色差：与孔径有关

彗差：与孔径、视场都有关

像散、场曲：对细光束，与视场有关。对宽光束，与孔径、视场都有关。

畸变：与视场有关。

各种像差均可展开成孔径、视场的级数。

孔径增大，宽光束像差大且难以校正。

视场增大，轴外像差大且难以校正。

光学设计：通过反复调整光学系统的参数，如半径、间隔、材料等，使光学系统的成像质量达到要求。

参考点移动引起的波像差，焦深

$$\text{由 } W = \frac{n'}{2} \int_0^{u'_m} \delta L' du'^2 \quad \text{轴向离焦: } \Delta W = \frac{n'}{2} \int \Delta l' du'^2 = \frac{n'}{2} \Delta l' u'^2_m$$
$$\text{垂轴离焦: } \Delta W = n' \Delta y' \sin U'^2_m = n' \Delta y' u'^2_m$$

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 l' ，则可按上式计算新的W。若

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

$$\text{由上可得} \quad \Delta l' \leq \frac{\lambda}{2n' u'^2_m} \quad \text{所以} \quad 2\Delta l' = \frac{\lambda}{n' u'^2_m}$$

焦深与像方孔径有关。像方孔径大则焦深小。

例

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

§ 10-6 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 $\leq \frac{\lambda}{4}$

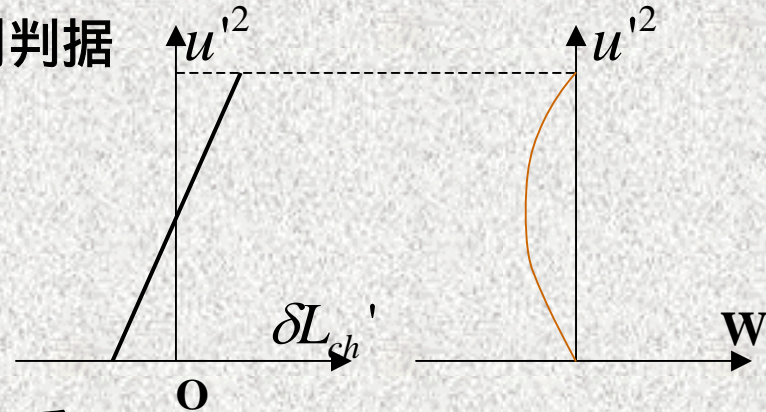
1. 色差 $W_{FC} \leq \frac{\lambda}{4} \sim \frac{\lambda}{2}$

2. 球差

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

所以 $\delta L'_m \leq 4 \frac{\lambda}{n'u'^2} = 4 \text{倍焦深}$

$$W_{\max} = \frac{n'}{16} \delta L' u_m'^2 \leq \frac{\lambda}{4}$$



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 $W = \frac{n'u_m'^2}{24} \delta L' \leq \frac{\lambda}{4}$

$$\delta L'_{0.707} = 6 \frac{\lambda}{n'u'^2} = 6 \text{倍焦深}$$

（边光不一定恰好校正到零，允许残余1倍焦深）

3. 正弦差

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

弧矢彗差

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

4. 像散

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

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：

$$\text{角度} \leq 2' \sim 4'$$

二、大像差系统（如摄影物镜）——应校正全部像差

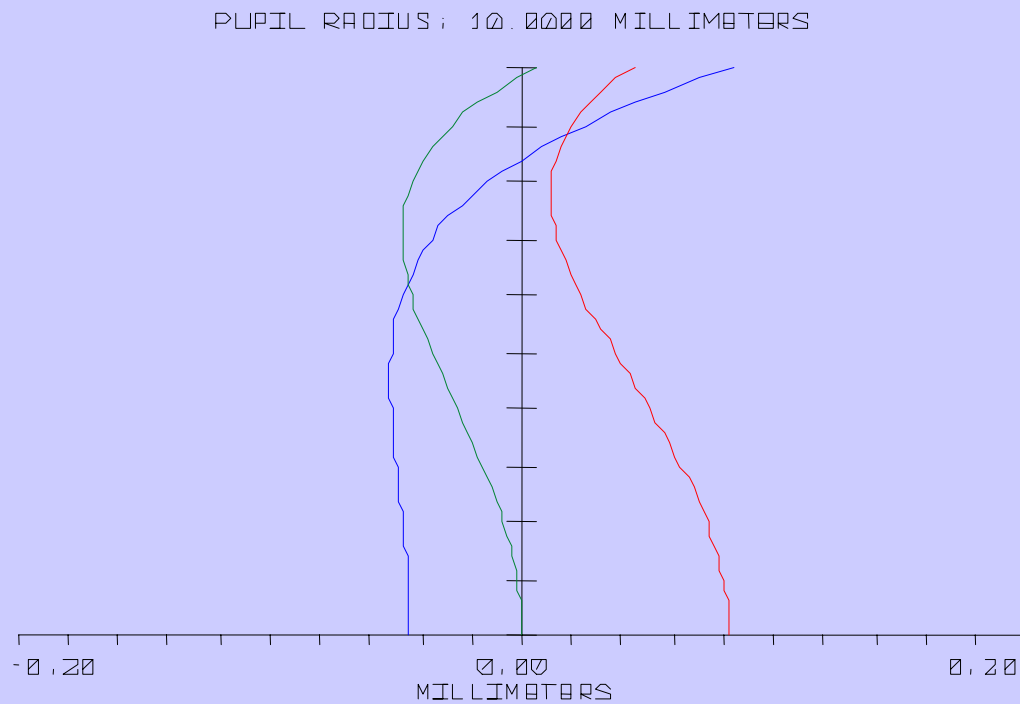
此时不可用瑞利判据，而要求 弥散斑直径 $\leq 0.03 \sim 0.1mm$

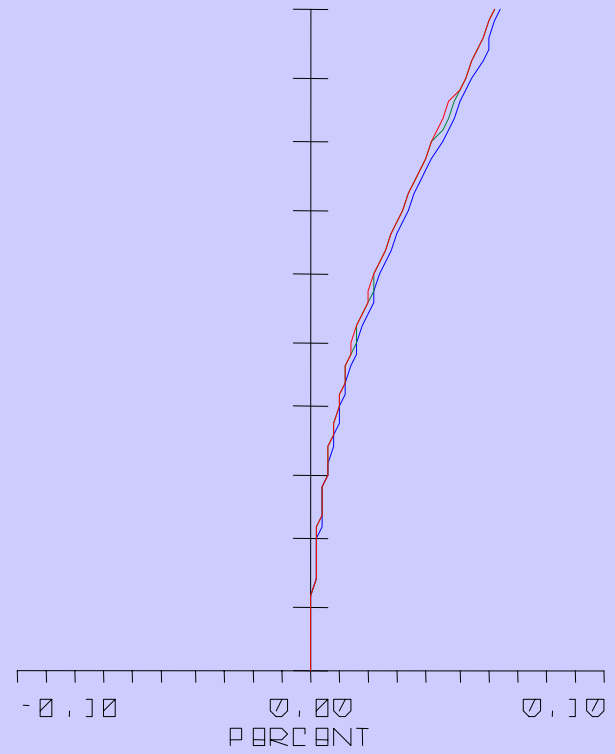
畸变2~4% （要求观察者看不出像的明显变形）

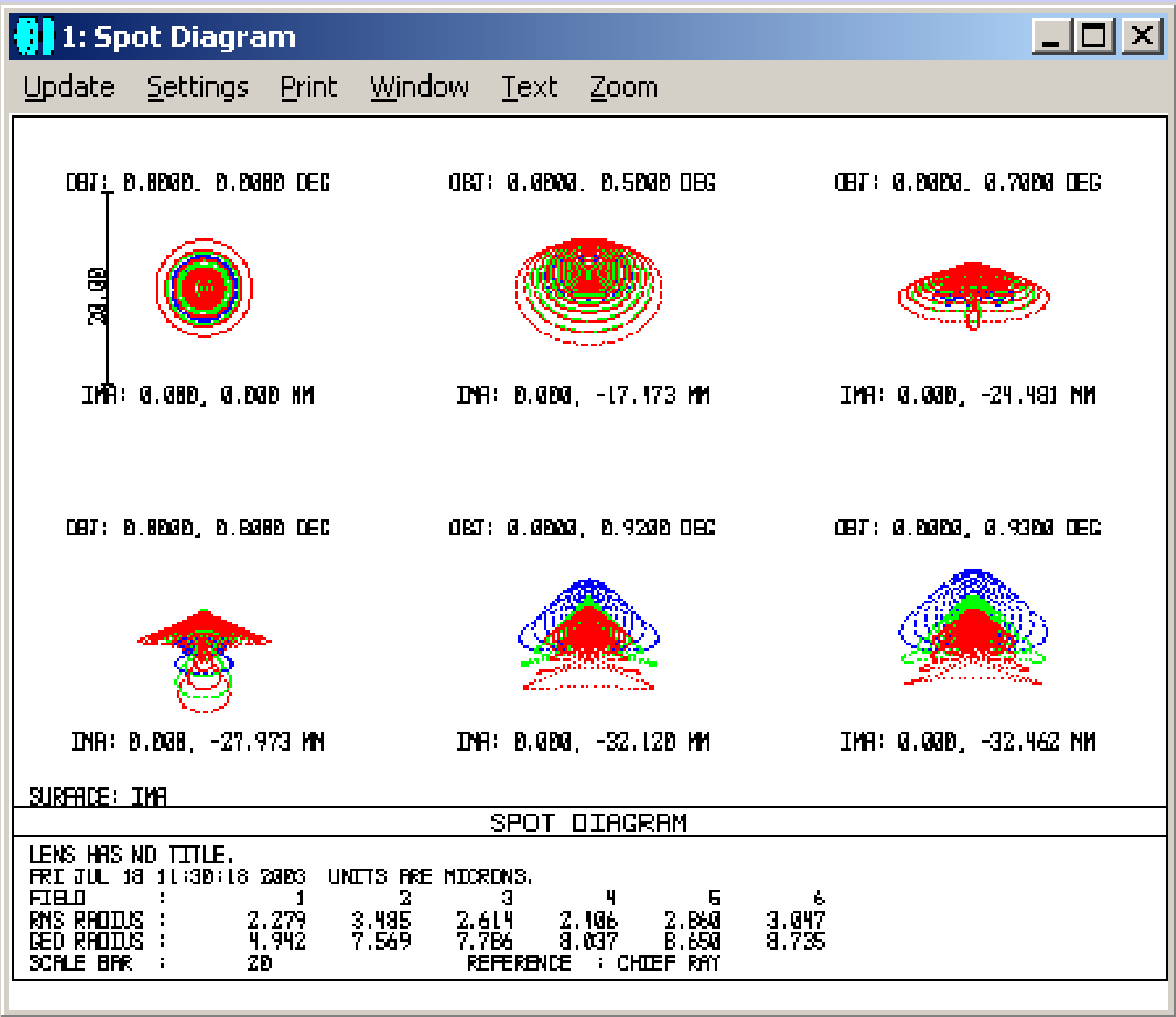
小视场大孔径系统到此为止，
以下针对大视场系统

§ 2-4 像质评价方法

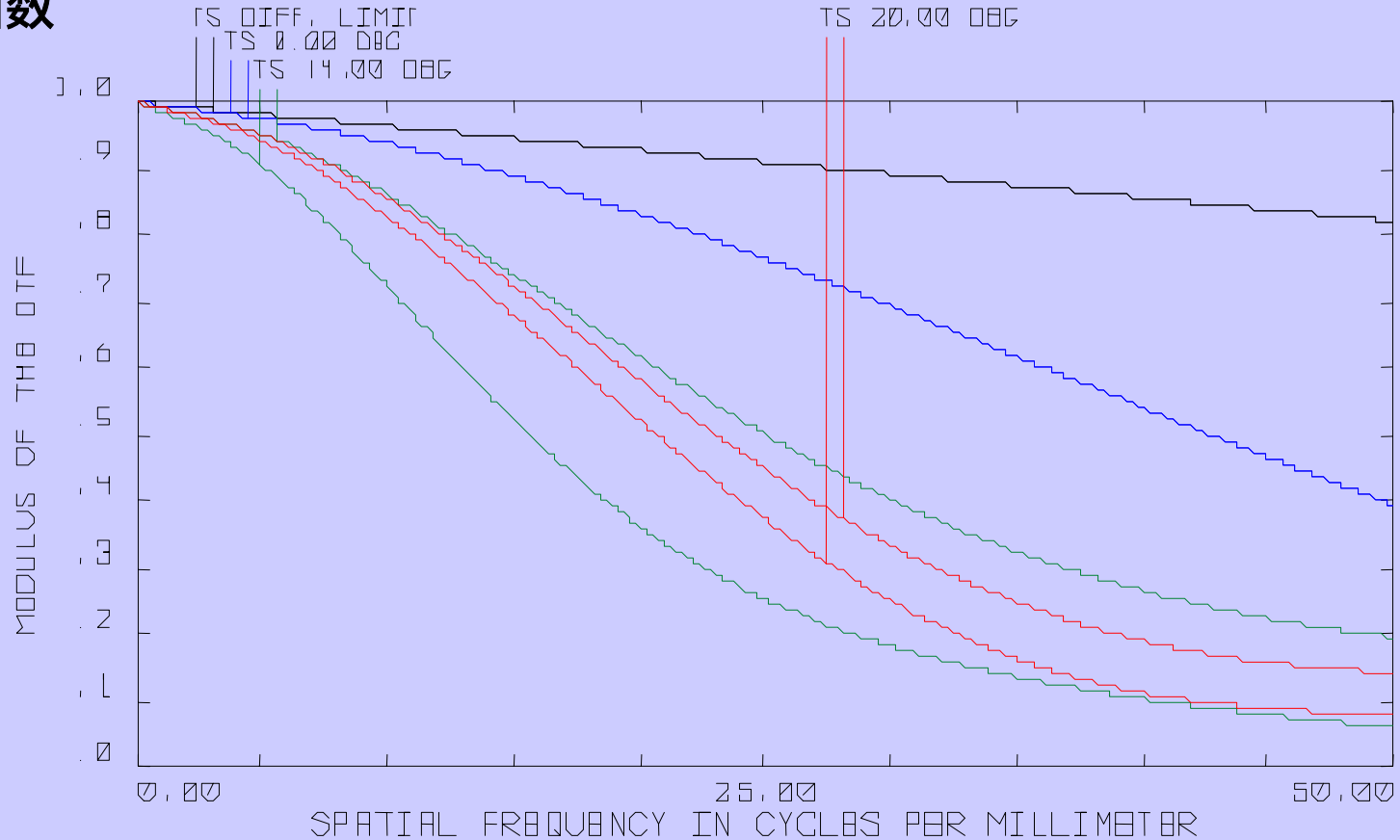
几何像差曲线







传递函数



调制传递函数MTF：一定空间频率下像的对比度与物的对比度之比。能反映不同频率、不同对比度的传递能力。一般而言，高频传递函数反映了物体细节传递能力，低频传递函数反映物体轮廓传递能力，中频传递函数反映对物体层次的传递能力。

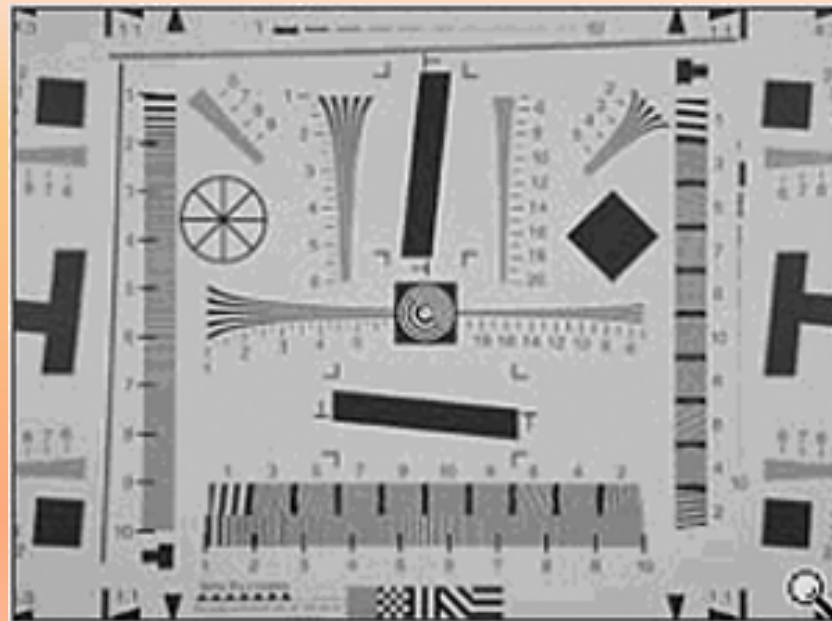
§ 2-5 光学系统像质检验

一、星点检验

二、分辨率

能被光学系统分辨开的两个物点(或像点)之间的最小距离，称为光学系统的分辨率或分辨本领。

它反映了光学系统分辨物体细微结构的能力，常用每毫米能区分的线条数表示。



三、传递函数测试

用光学传递函数测试仪，主要指标：

测试口径、物镜焦距、测试误差、重复性误差、空间频率范围、
最小频率间隔、测试波长、自动调焦精度

