

# 第五部分 光学设计

浙江大学光学工程研究所

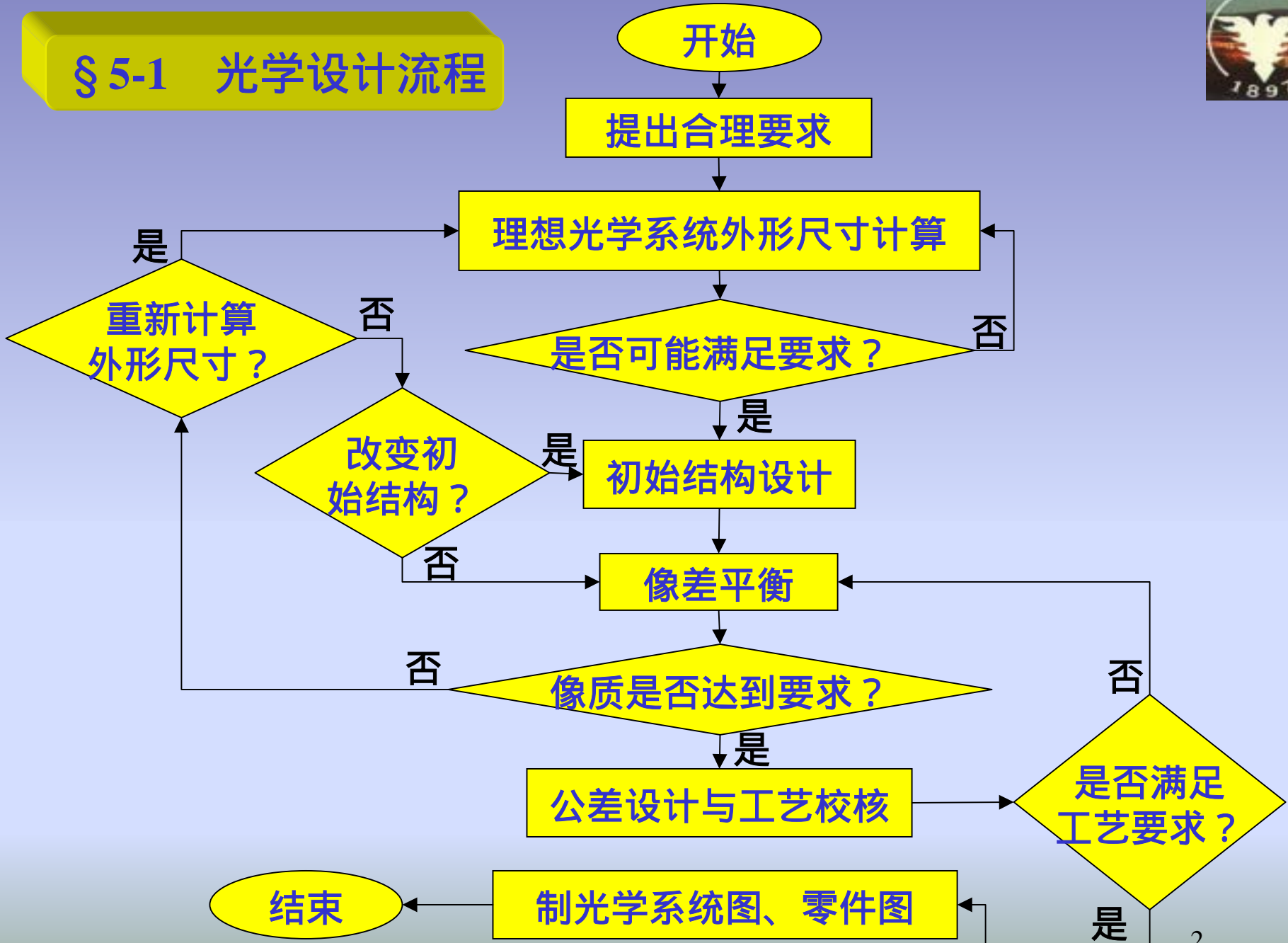
李晓彤、岑兆丰

电话、传真：0571 - 87952302

电子邮件：[lixt@zju.edu.cn](mailto:lixt@zju.edu.cn)  
[cenzf@zju.edu.cn](mailto:cenzf@zju.edu.cn)



# § 5-1 光学设计流程





## § 5-2 光学设计各阶段需要考虑的问题

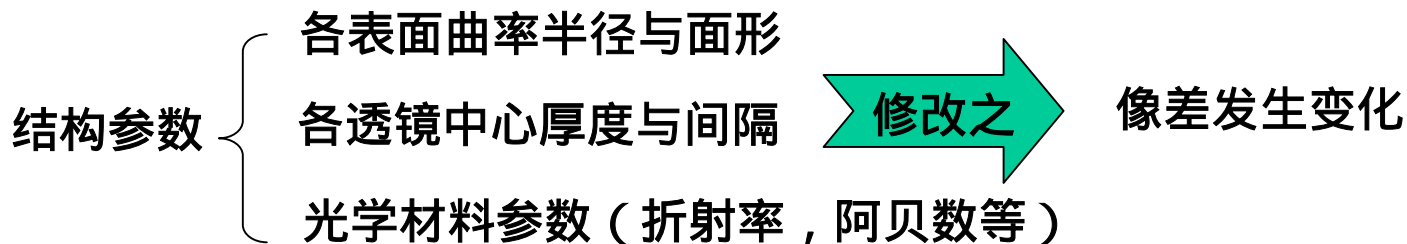
- 一、提出的要求是否合理：如分辨率，传递函数，畸变等
- 二、作外形尺寸计算时：各镜组的光焦度分配要合理，总长度一般应比要求略短。
- 三、初始结构设计时：应考虑像差校正的可能性，并适当选择光学材料。
- 四、像差平衡时：应考虑工艺性要求，包括正透镜的边缘厚度、负透镜的中心厚度以及可能需要考虑的其他一些特殊的工艺要求。





## § 5-3 光学自动设计概述

### 一、结构参数和像差函数



可以认为, 各种像差是结构参数的函数, 写成

$$\begin{cases} f_1 = f_1(x_1, x_2, \dots, x_n) \\ f_2 = f_2(x_1, x_2, \dots, x_n) \\ \dots \\ f_m = f_m(x_1, x_2, \dots, x_n) \end{cases}$$

其中  $x_1, x_2, \dots, x_n$  为结构参数  
 $f_1, f_2, \dots, f_m$  为各种像差

**注意**

1. 所谓像差是广义的;
2. 由于结构参数的变化不全是任意的, 各种像差之间存在相关性, 应根据需要对像差进行综合平衡。

根据什么来平衡?





## 二、评价函数——能综合评价像质好坏的函数

$\varphi = \varphi(x)$      $\varphi$  越小，像质越好，所以也称为目标函数

怎样构成

要求：	能充分综合地反映成像质量	几何像差
		波像差+畸变+色差
计算方便		点列图
		光学传递函数

评价函数的形式：
$$\varphi(x) = W_1^2(f_1 - f_1^*)^2 + W_2^2(f_2 - f_2^*)^2 + \dots + W_m^2(f_m - f_m^*)^2$$

其中  $f_1, f_2, \dots, f_m$  为各像差函数

$f_1^*, f_2^*, \dots, f_m^*$  为各像差目标值

$W_1, W_2, \dots, W_m$  为一组非负值，均为权因子

在光学设计中根据不同的情况修改权因子的大小是一项主要的工作。

要严格控制的像差W大；  
 控制比较松的像差W小；  
 不控制的像差W=0。





### 三、自动设计的算法

优化算法中应用最多最成功的——**加权阻尼最小二乘法**

即：使像差函数平方和最小。

事实上，像差函数非常复杂，一般根本写不出它的显式。所以这个优化求解过程是对一个非线性方程组的求解，如有阻尼因子的牛顿迭代法。在线性比较好时，阻尼因子变小，使收敛速度快；线性比较差时，阻尼因子变大，使收敛速度慢。

### 四、边界条件

二类边界条件 { 第一类：中心厚度，折射率，半径的变化范围——冻结法，严格控制  
第二类：边缘厚度，后截距，系统总长度——作为像差处理



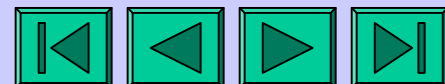


### 光学零件外径余量

通光口径(mm)	外径(mm)		通光口径(mm)	外径(mm)	
	用滚边固定	用压圈固定		用滚边固定	用压圈固定
到 6	D + 0.6	-	> 30 - 50	D + 2.0	D + 2.5
> 6 - 10	D + 0.8	D + 1.0	> 50 - 80	D + 2.5	D + 3.0
> 10 - 18	D + 1.0	D + 1.5	> 80 - 120	-	D + 3.5
> 18 - 30	D + 1.5	D + 2.0	> 120	-	D + 4.5

### 透镜边缘及中心最小厚度

透镜直径 (mm)	正透镜边缘最小厚度(mm)	负透镜中心最小厚度(mm)
3 - 6	0.4	0.6
> 6 - 10	0.6	0.8
> 10 - 18	0.8 - 1.2	1.0 - 1.5
> 18 - 30	1.2 - 1.8	1.5 - 2.2
> 30 - 50	1.8 - 2.4	2.2 - 3.5
> 50 - 80	2.4 - 3.0	3.5 - 5.0
> 80 - 120	3.0 - 4.0	5.0 - 8.0
> 120 - 150	4.0 - 6.0	8.0 - 12.0



# § 5-4 光学材料简介



光学系统 { 反射零件——反射率及其稳定性  
 折射零件——透明度，吸收系数，透明波段等

光学材料

光学玻璃  
 光学晶体  
 光学塑料

## 1、光学玻璃的技术参数

折射率

色散

谱线	C	D	<i>d</i>	e	F	g	h
(nm)	656.3	589.3	587.6	546.1	486.1	435.8	404.7
参数	$n_C$	$n_D$	$n_d$	$n_e$	$n_F$	$n_g$	$n_h$

人眼最灵敏波长555nm，  
 两个极端C，F

$$n_F - n_C$$

平均色散

$$V = \frac{n_D - 1}{n_F - n_C}$$

阿贝常数

平均色散系数





用 $n$ 和  $\nu$  可以表征玻璃的光学性能。

例如：K9玻璃， $n=1.5163$ ， $\nu=64.1$

一般玻璃  $n=1.4$ 至 $1.8$

## 2、光学玻璃分类及其技术参数

K 冕牌玻璃  $n$ 小 大 QK K PK BaK ZK LaK 等

F 火石玻璃  $n$ 大 小 KF QF BaF F ZF ZBaF LaF TF ZLaF 等

还要求：光学均匀性、化学稳定性（ $n$ 大时往往较软，化学稳定性差）

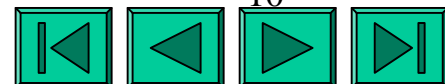
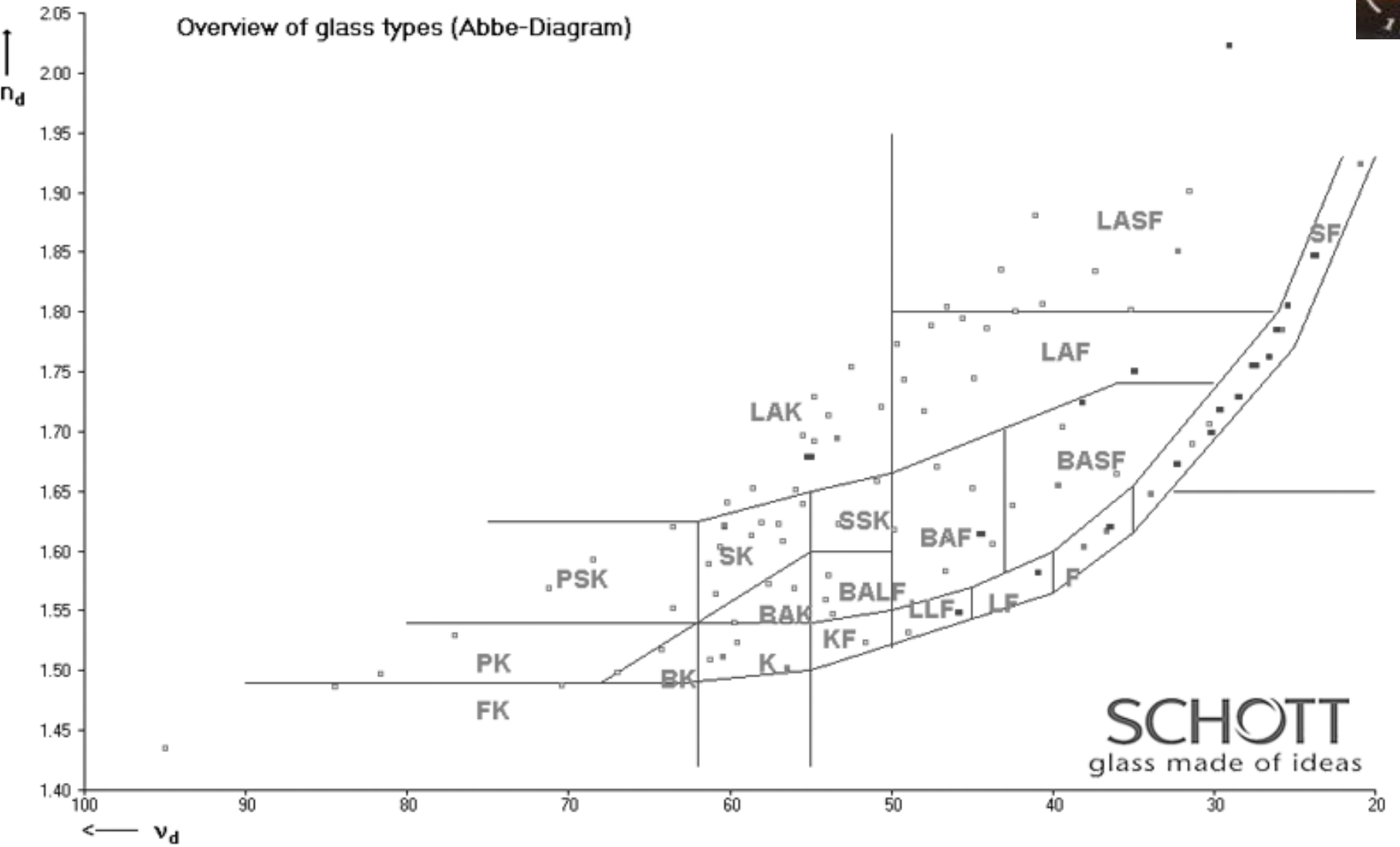
气泡、条纹、内应力等，皆对成像有影响

应根据仪器要求挑选不同等级的玻璃





Overview of glass types (Abbe-Diagram)





## § 5-5 典型光学镜头 显微镜的物镜

光学系统的主要参数： $f', D/f', 2W$  在此与  $\sigma$ 、 $A$ 、 $2y$  有关

$$u' - u = \frac{1}{2} \frac{D}{f'} \Rightarrow u \left(1 - \frac{1}{\beta}\right) = -\frac{1}{2} \frac{D}{f'} \quad \text{而} \quad A = n \sin U$$

分辨率要求 $A$ 大， $M$ 要与之相适应，物镜的放大率也要相应匹配，并在规定机械筒长下使用（例如，170mm）

有载玻片、盖玻片

设计时要考虑盖玻片

物镜外壳上标明参数，见书

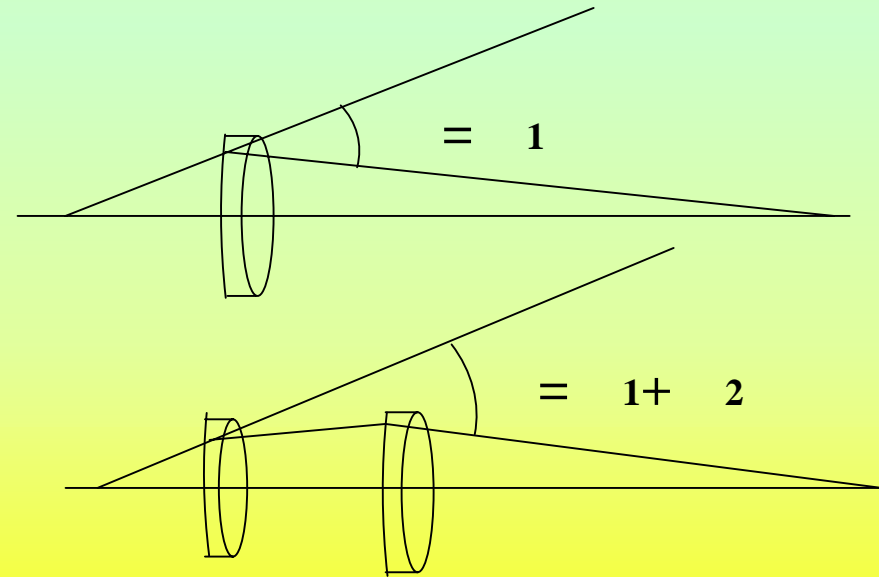
低倍物镜：双胶合

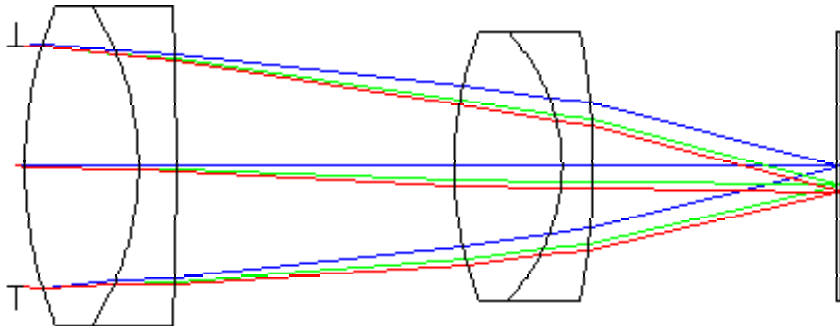
中倍物镜：双双胶合

高倍物镜：中倍+前片

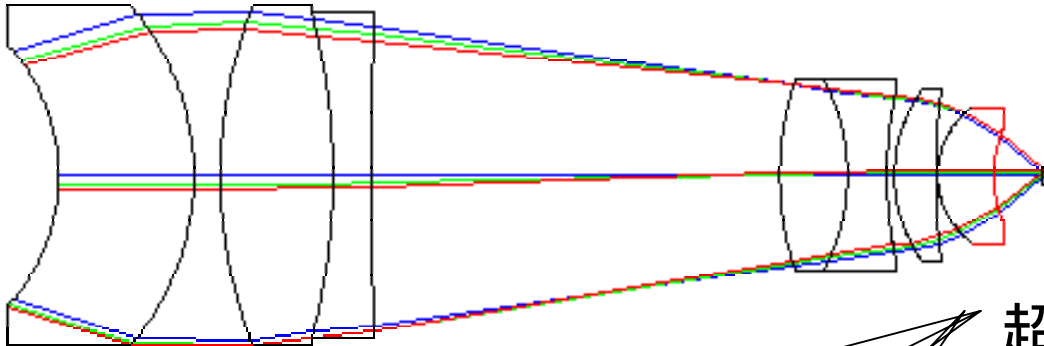
阿贝物镜：浸油

$M$ 大  
 $A$ 大



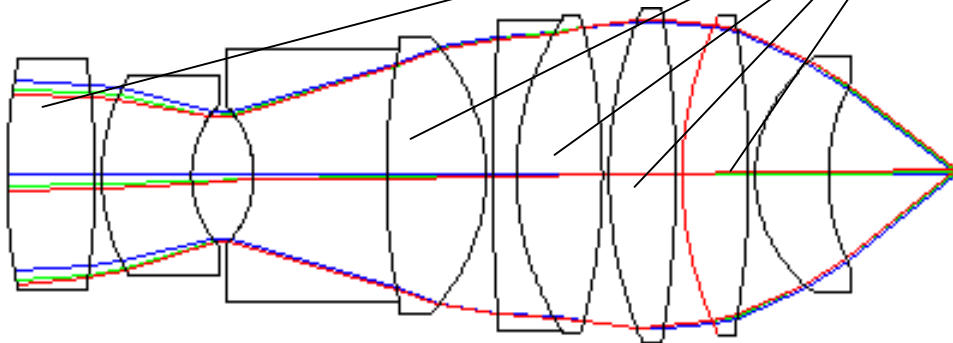


Lister



平场消色差

超低色散玻璃



长工作距平场复消色差





# 目镜

——相当于放大镜，其入瞳就是物镜的出瞳，其出瞳在  $F_e'$  稍后处，与  $F'$  重合

一般有二片：向场镜 + 接目镜

重要参数：镜目距——接目镜最后一面到眼瞳（出瞳）的距离

$$l_p' \geq 6 \sim 8mm$$

工作距离——向场镜第一面到目镜前焦面（物镜像面）的距离

该面要安放分划板（视阑）

近视眼观察时不能因调焦而使目镜碰到分划板

$$f', \frac{D}{f'}, 2W$$

由  $M_e = \frac{250}{f_e'}$   $f_e'$  较小，由于  $M_o$  大， $D/f'$  小， $2W$  大

为短焦距小孔径大视场系统





# 望远镜的物镜

1. 物镜： $f'$  大， $D/f'$  中等， $2W$  小

主要校正轴上点像差

折射式：双胶合（ $D > 60\text{mm}$ 时不适于胶合）

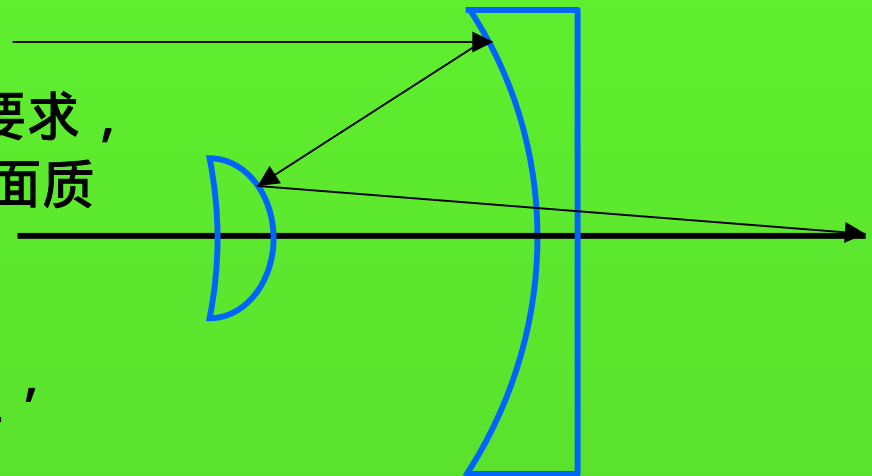
双分离  $d_{air} \approx 0$

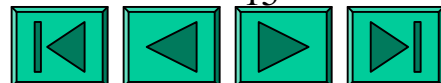
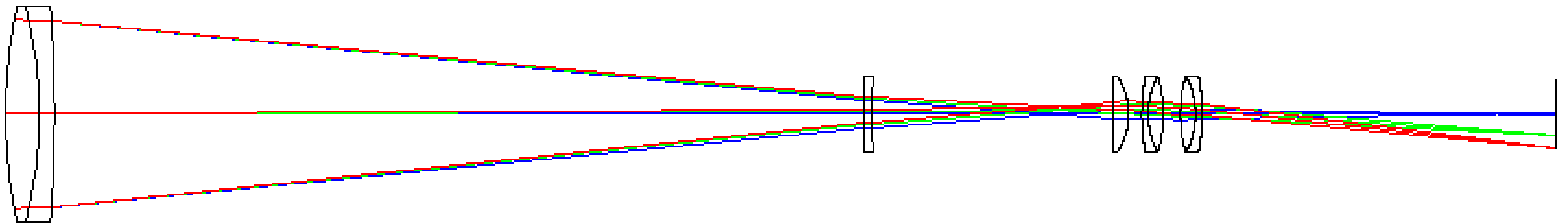
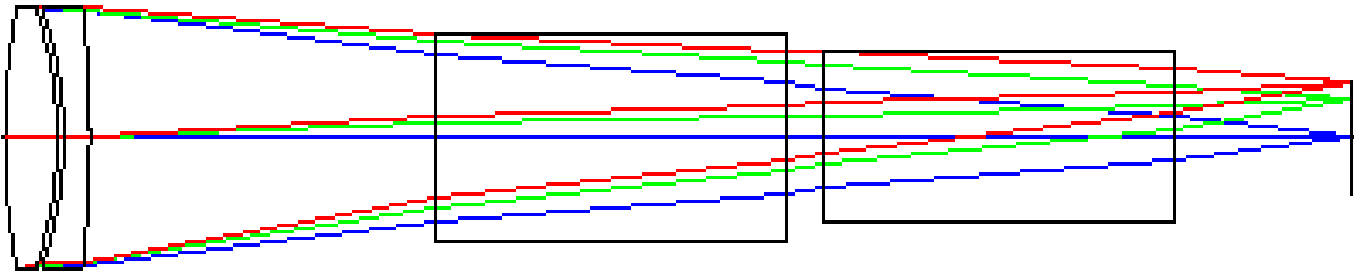
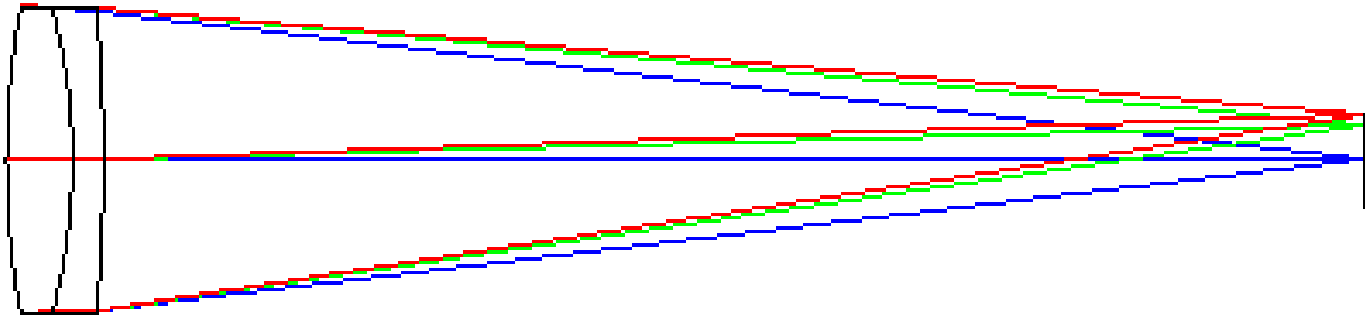
三片式

内调焦

反射式： $D$ 很大，对材料无严格要求，筒长较短，完全无色差，但对表面质量要求更高，且要用非球面

折反射式：以球面反射镜为基础，再加用于校正像差的折射元件而构成，可避免大型非球面加工







目镜： $f_2'$  小， $D/f_2'$  中等， $2W$  大

### 主要校正轴外像差

对于瞄准、测量用望远镜，为能使非正常眼亦能观察，目镜应能作视度调节。设调节量为  $l$ ，则

$$\Delta l \bullet x' = xx' = f_2 f_2' \quad \text{其中 } x' \text{——远点距}$$

若调节  $\pm N$  屈光度，

$$\Delta l = -\frac{f_2'^2}{x'} = -\frac{f_2'^2}{r} = \mp \frac{Nf_2'^2}{1000} \text{ (mm)}$$

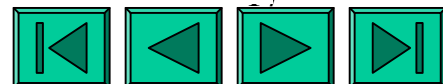
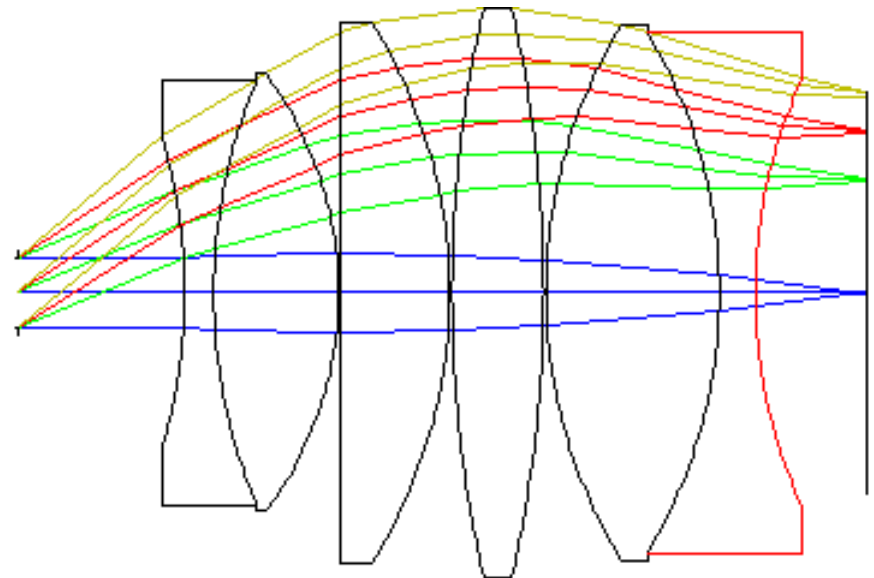
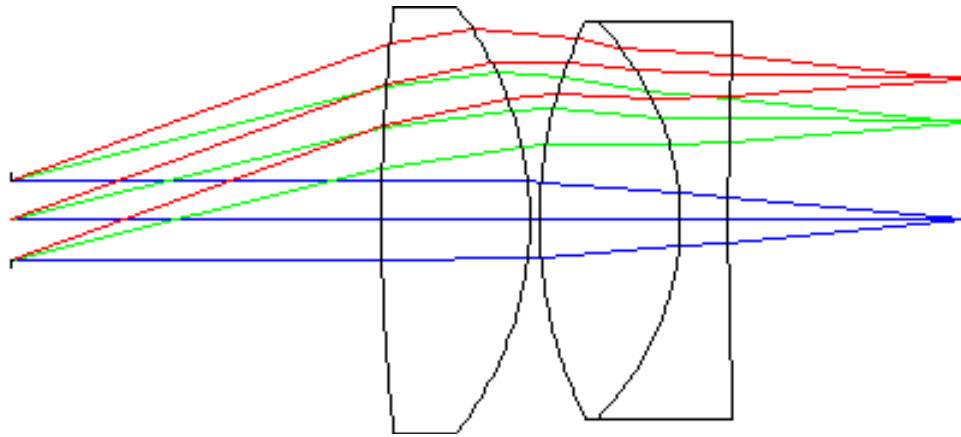
一般要求调节  $\pm 5$  屈光度，得  $\Delta l = \mp \frac{f_2'^2}{200} \text{ (mm)}$

例如， $f_2' = 25 \text{ mm} \Rightarrow \Delta l \approx \mp 3 \text{ mm}$

要求目镜工作距离  $> l$

工作距离 焦距

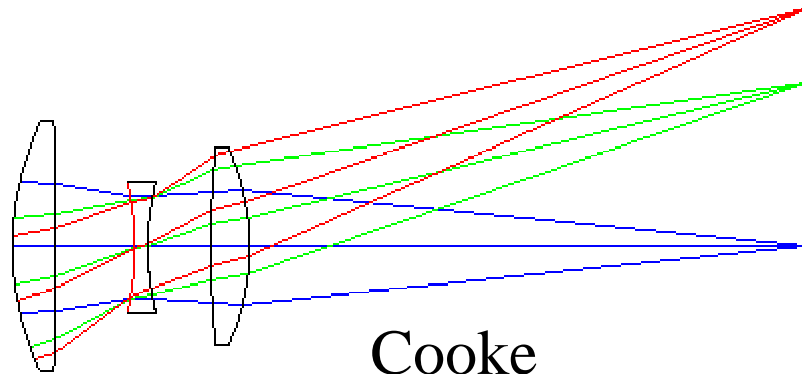




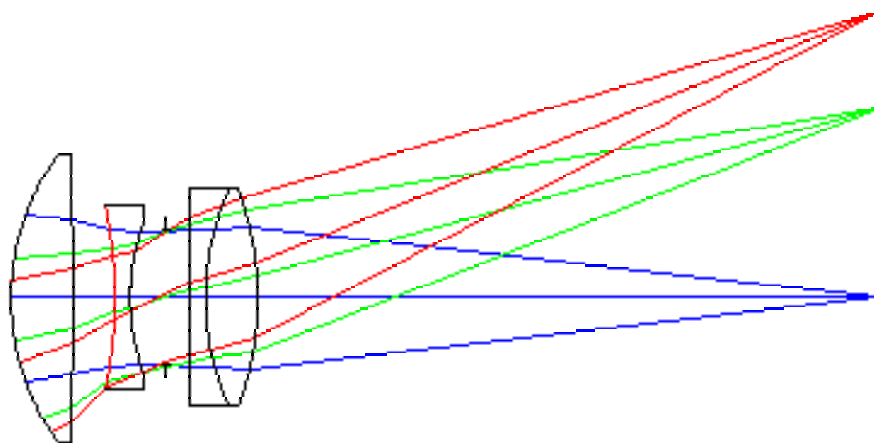


# 摄影物镜

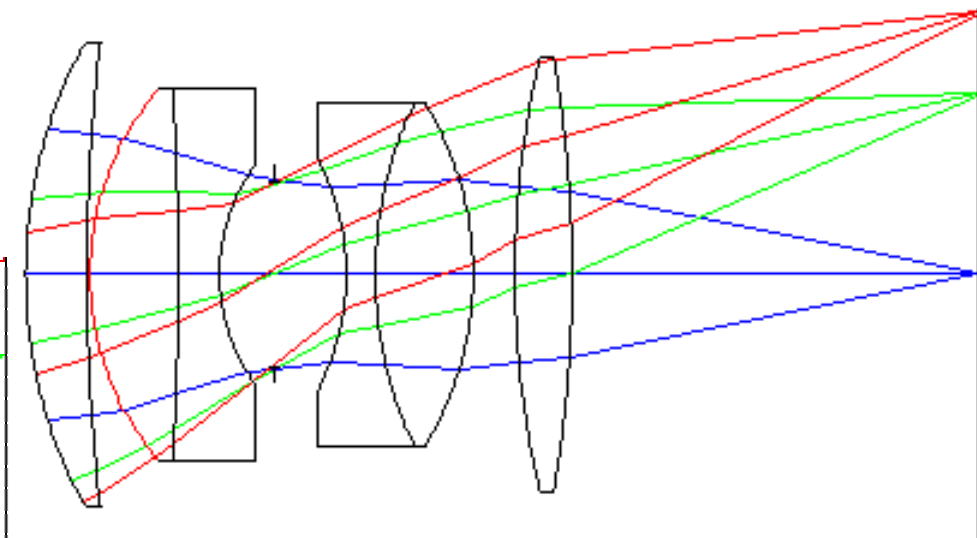
大视场、大孔径系统，需校正各种像差，属大像差系统。



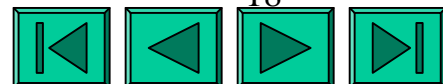
Cooke



Tessar

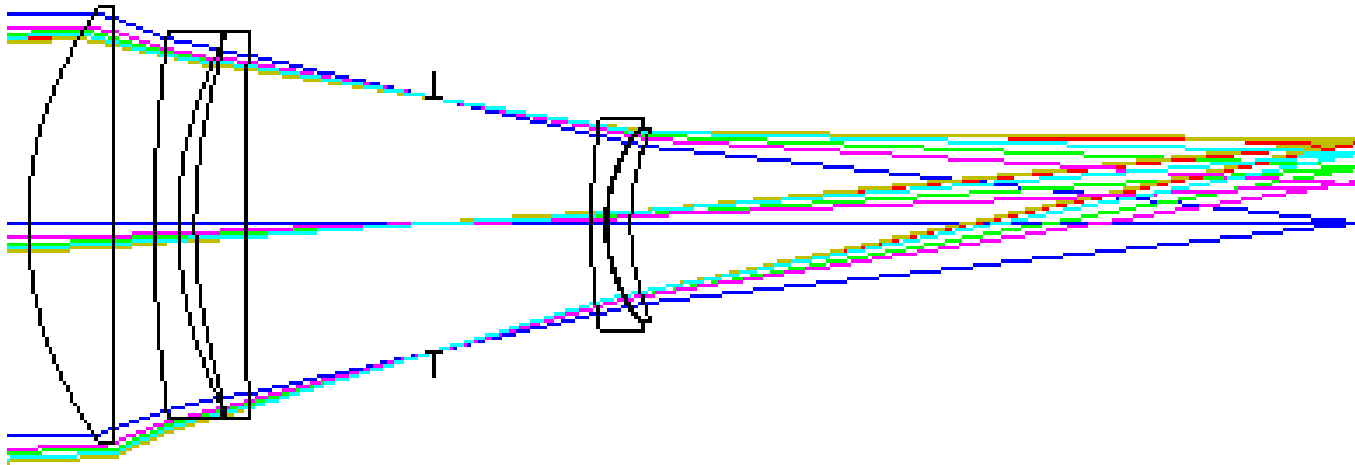


Double Gauss

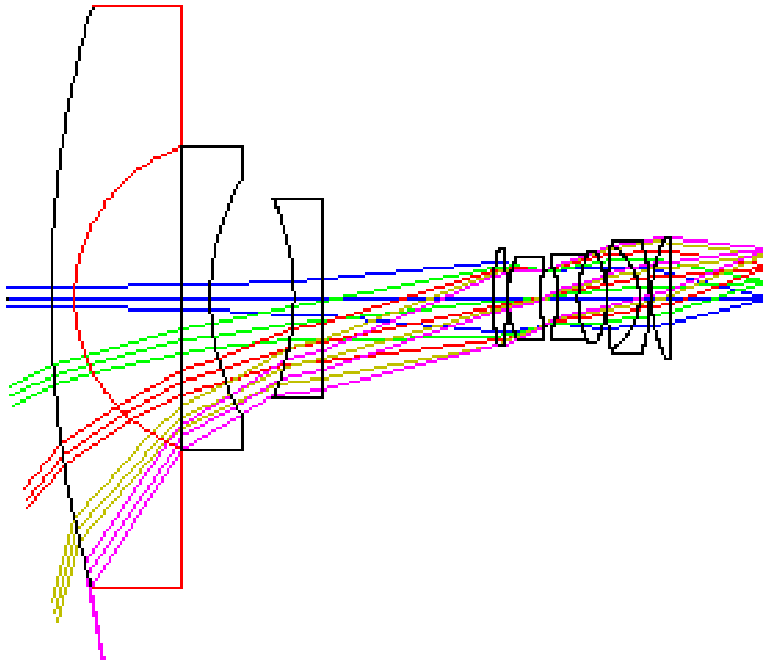




$f' = 500$   $L = 350$

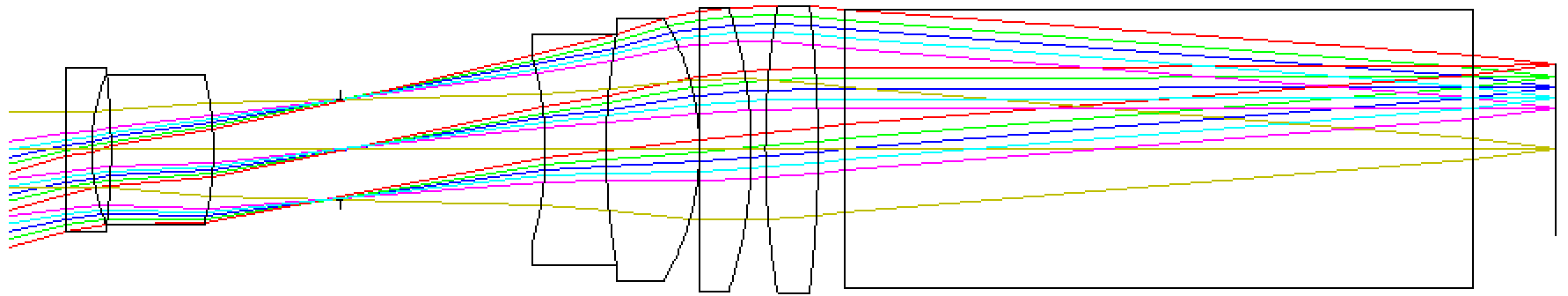


鱼眼物镜  $2W = 200^\circ$

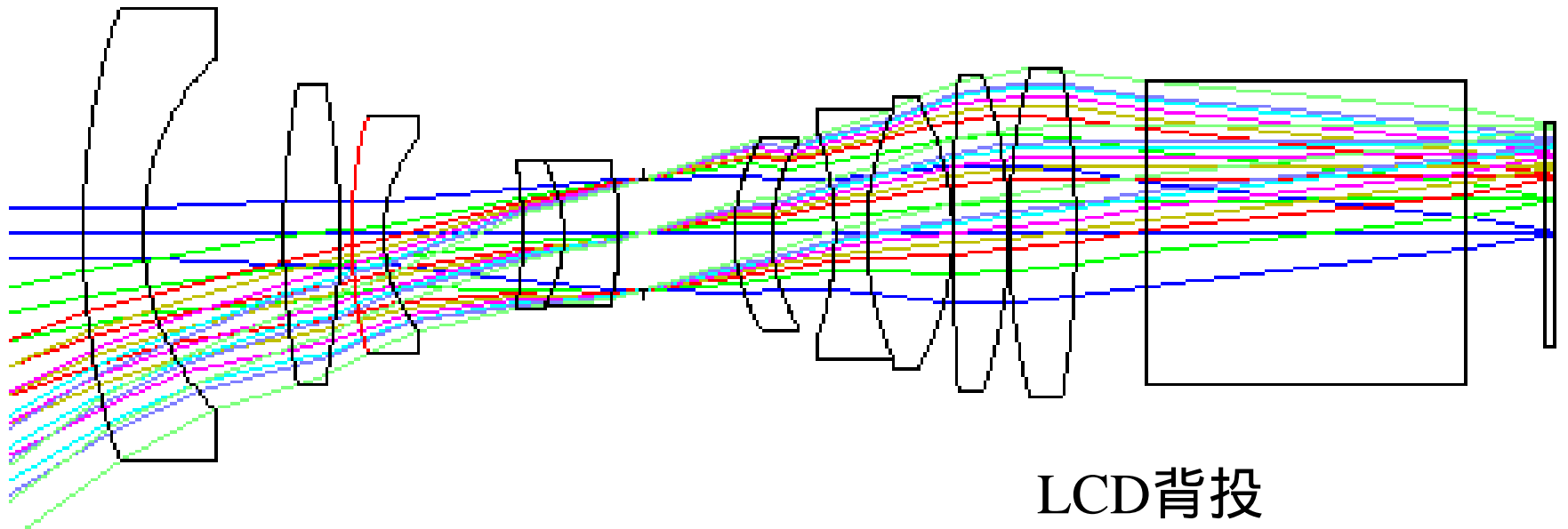




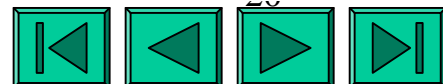
# 投影物镜



## LCOS投影



## LCD背投





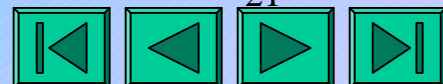
## § 5-6 非球面及其在光学系统中的应用

非球面的作用 {

- 简化结构
- 提高像质
- 满足某些特殊要求

常用非球面 {

- 二次曲面
- 高次小变形连续非球面
- 其他特殊连续非球面
- 面形有限间断的非球面



# 一般旋转对称非球面的数学表示



常规光学系统中主要应用旋转对称的非球面，可认为是它的子午截线绕光轴转动而成。设光轴为 $z$ 轴，非球面顶点为坐标原点，则一般的旋转对称非球面可表示为

$$z = Ar^2 + Br^4 + Cr^6 + Dr^8 + Er^{10} + \dots$$

其中  $r^2 = x^2 + y^2$

通常光学设计软件中采用基准二次曲面 + 变形的的方法来描述：

偶次非球面

$$z = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2r^2}} + a_2r^4 + a_3r^6 + a_4r^8 + a_5r^{10} + \dots$$

$a_2, a_3, a_4, a_5$  等各项系数表示非球面相对于基准二次曲面的变形。

奇次非球面

$$z = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2r^2}} + \beta_1r^1 + \beta_2r^2 + \beta_3r^3 + \beta_4r^4 + \dots$$



# 旋转对称偶次非球面的初级像差贡献



方法：将非球面看成一个球面与中心厚度无限薄的校正板的结合，考察其波差。

$$z = \frac{1}{2r} y^2 + By^4 + Cy^6 + Dy^8 + Ey^{10} + \dots$$

在原点与非球面相切的球面方程为

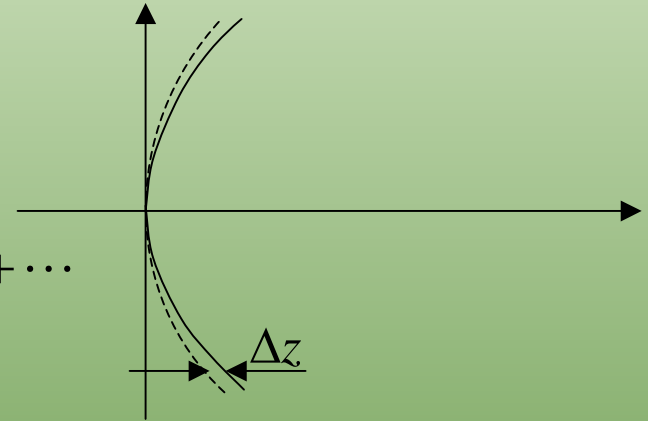
$$z = \frac{1}{2r} y^2 + \frac{1}{8r^3} y^4 + \frac{1}{16r^5} y^6 + \frac{5}{128r^7} y^8 + \frac{7}{256r^9} y^{10} + \dots$$

二式相减得

$$\Delta z = \frac{b}{8r^3} y^4 + \frac{c}{16r^5} y^6 + \frac{5d}{128r^7} y^8 + \dots$$

二式比较得

$$B = \frac{1+b}{8r^3}$$



当只考虑初级量时，引起的附加程差

$$\Delta s = (n' - n)\Delta z = (n' - n) \frac{b}{8r^3} y^4$$

由此导致初级像差系数的改变。

初级像差系数的增量为

$$\Delta S = \frac{(n'-n)b}{r^3} h^4$$

$$\Delta S = 0$$

$$\Delta S = 0$$

$$\Delta S = 0$$

$$\Delta S = 0$$

$$\Delta C = 0$$

$$\Delta C = 0$$

当光阑不在校正板上时，初级像差系数的增量为

$$\Delta S = \frac{(n'-n)b}{r^3} h^4$$

$$\Delta S = \Delta S \frac{h_p}{h}$$

$$\Delta S = \Delta S \left(\frac{h_p}{h}\right)^2$$

$$\Delta S = 0$$

$$\Delta S = \Delta S \left(\frac{h_p}{h}\right)^3$$

$$\Delta C = 0$$

$$\Delta C = 0$$





# 旋转对称光学系统中非球面的应用

## 基本思路

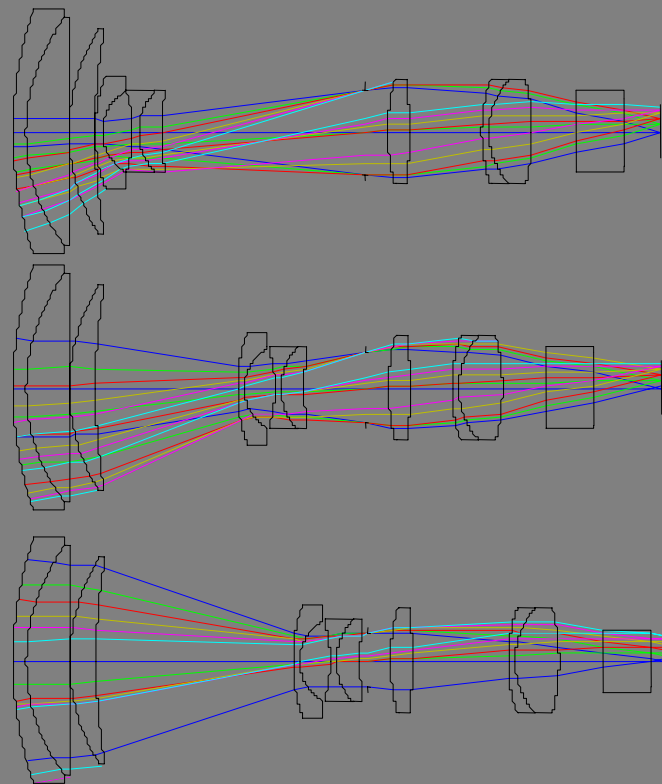
确定哪一个光组、哪一个表面采用非球面最合适

孔径光阑附近的非球面对轴上像差贡献大  
远离孔阑的非球面对轴外像差贡献大

根据非球面应起的校正像差作用确定非球面的位置，适当考虑光学材料的加工性能

对于组元间有相对运动的变焦距系统，非球面的应用应首先着眼于整个系统的性能优化

F5.4~64F1.8~2.7数字摄像机镜头

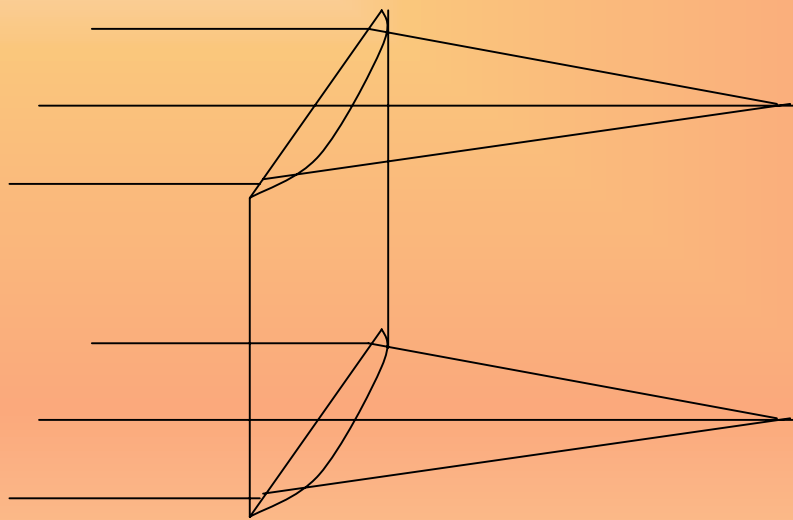


# 特殊连续非球面在光学系统中的应用

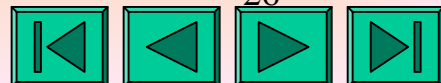


柱面的应用——常用于宽银幕电影放映系统中，  
也用于像散光束的校正

宽银幕镜头——两个垂直方向具有不同的倍率，用柱面透镜

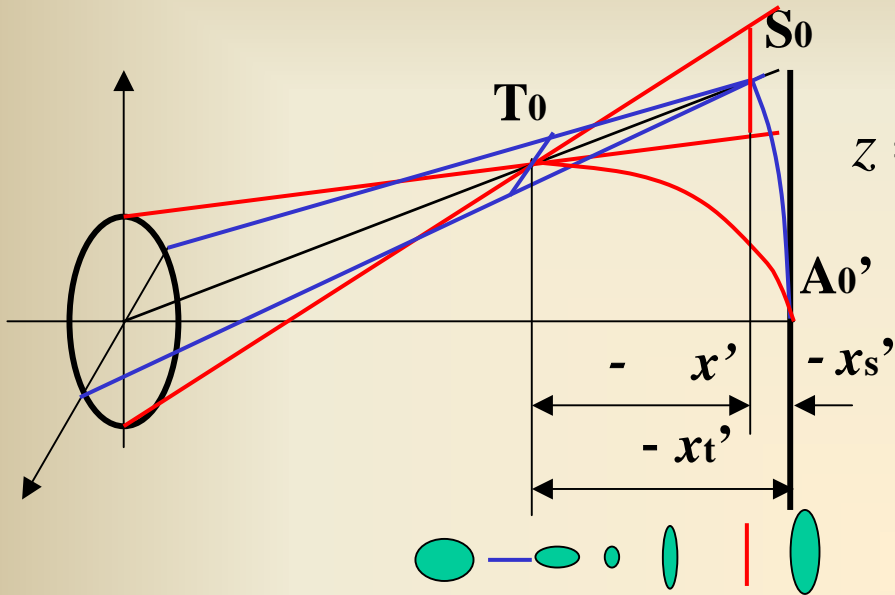


单个柱面透镜二方向的像不重合，必须成对使用，组成望远镜系统。这时一个方向  $\times = -2$ ，另一个方向相当于平板。

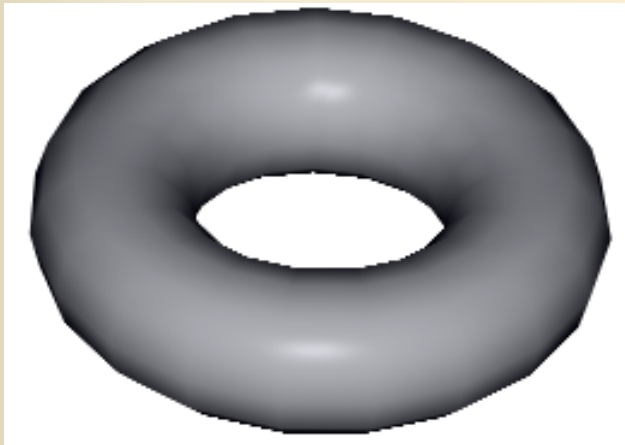
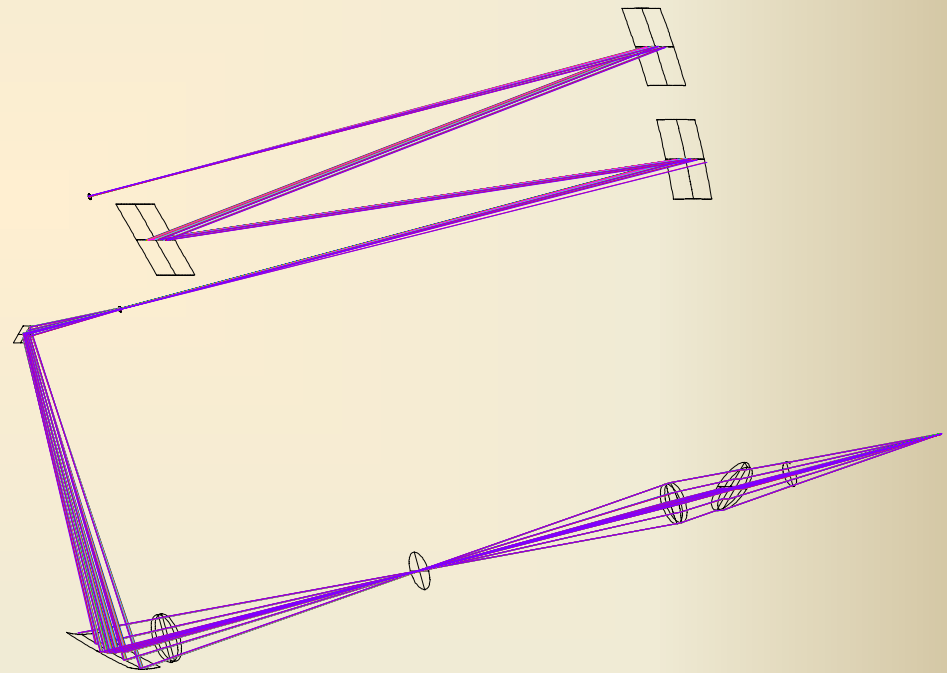




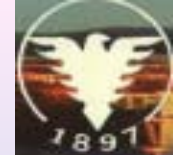
# 一般双曲率面的应用——像散光束的产生与校正



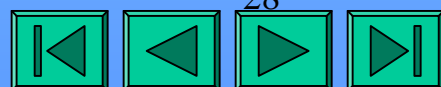
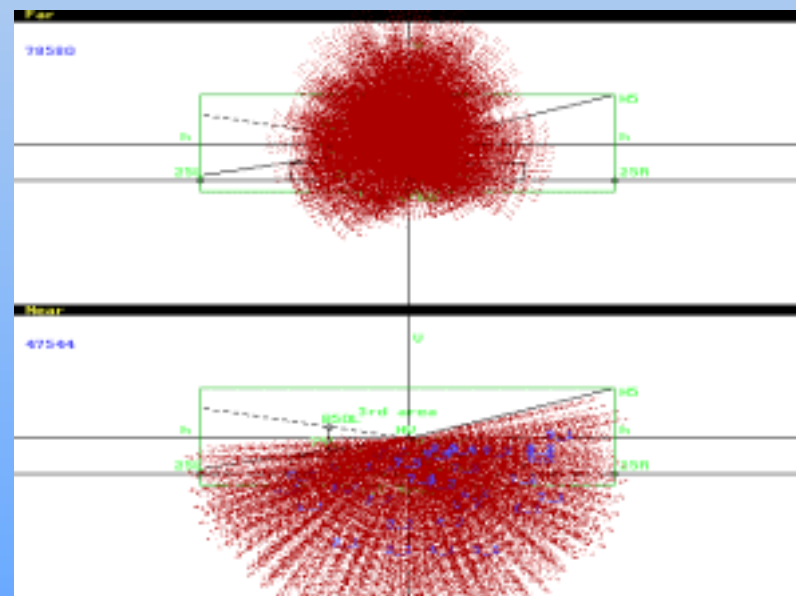
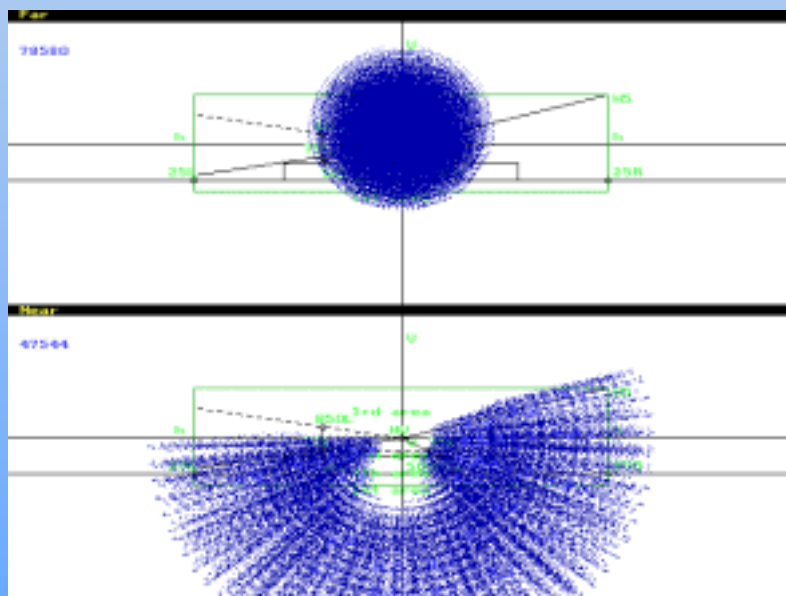
$$z = \frac{c_x x^2 + c_y y^2}{1 + \sqrt{1 - (1 + k_x) c_x^2 x^2 - (1 + k_y) c_y^2 y^2}}$$



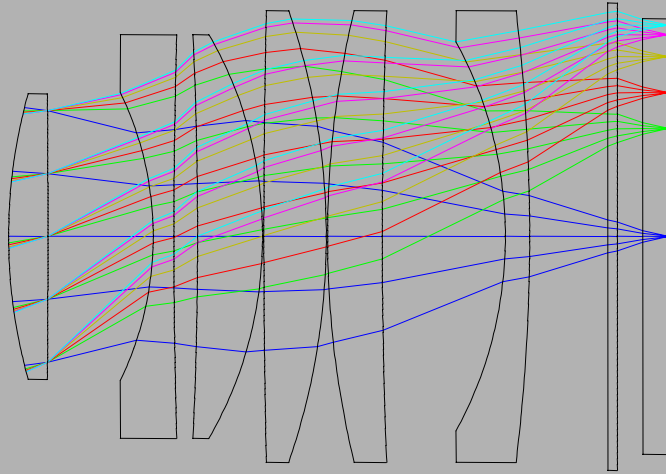
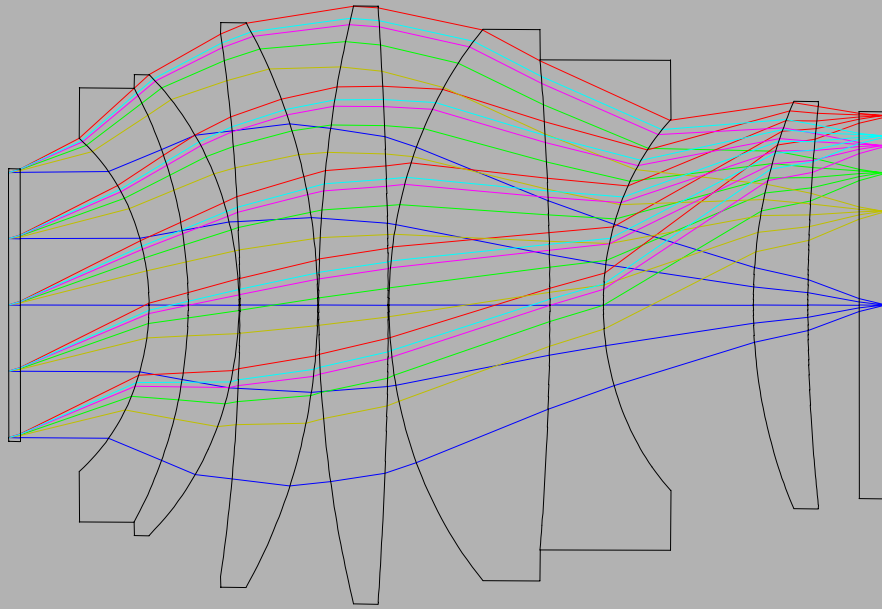
# 面形为有限间断的非球面应用简介



## 汽车前照灯反射配光镜



# 光学系统中菲涅尔透镜的应用



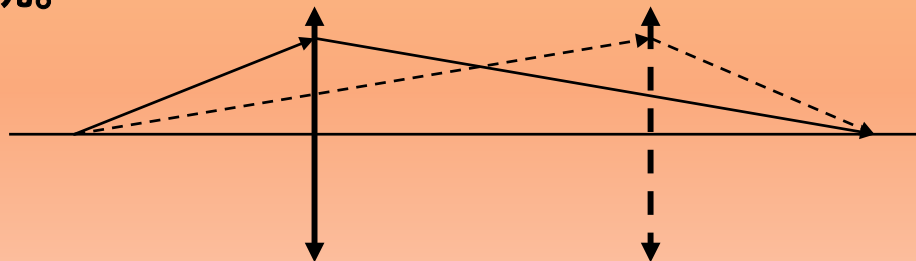
## § 5-7 变焦距系统原理与设计



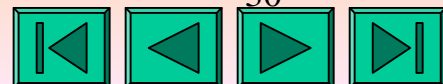
### 变焦距光学系统基本原理

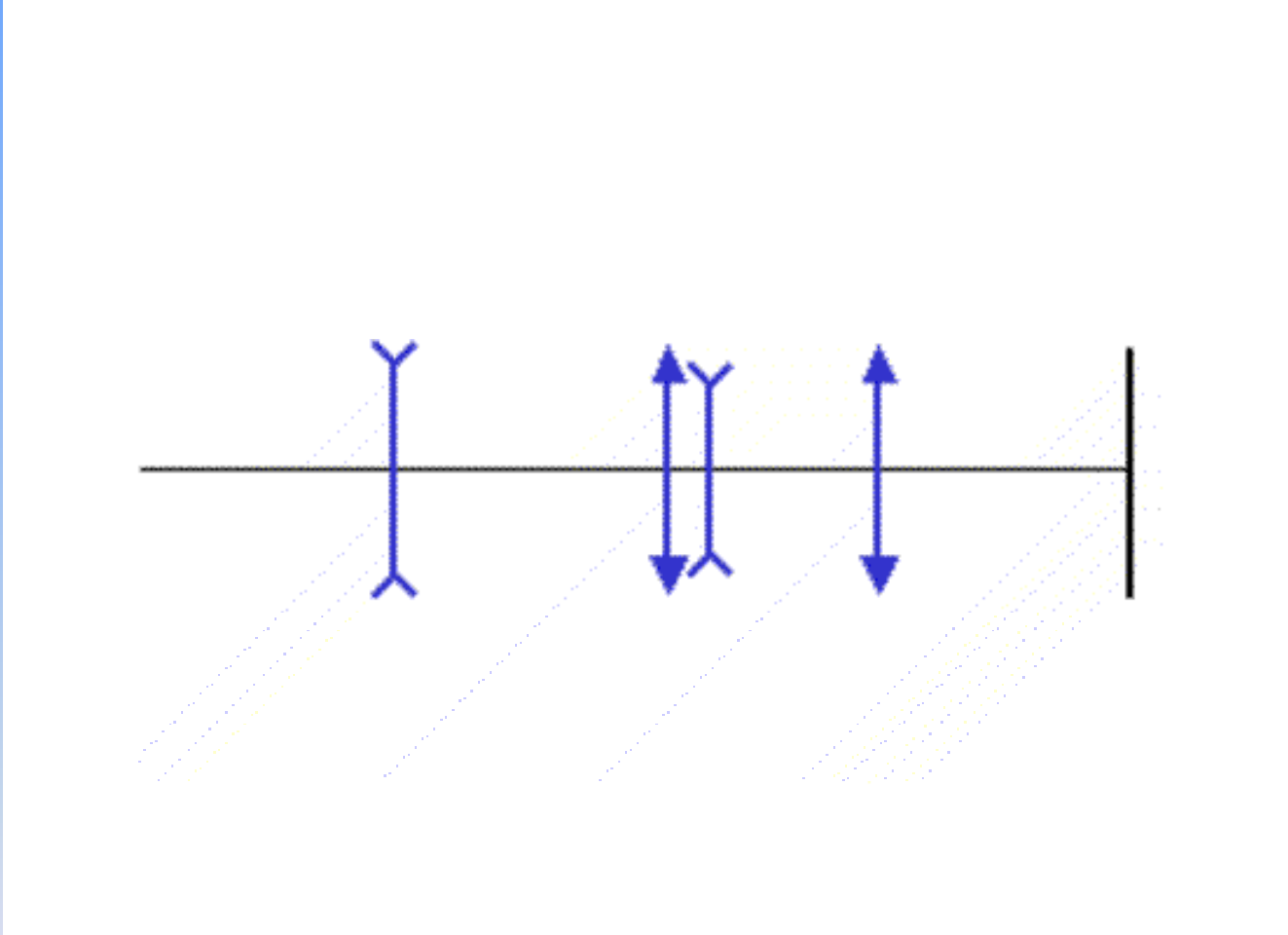
变焦距系统：利用系统中某些镜组的相对位置移动来连续改变焦距或放大倍率的光学系统

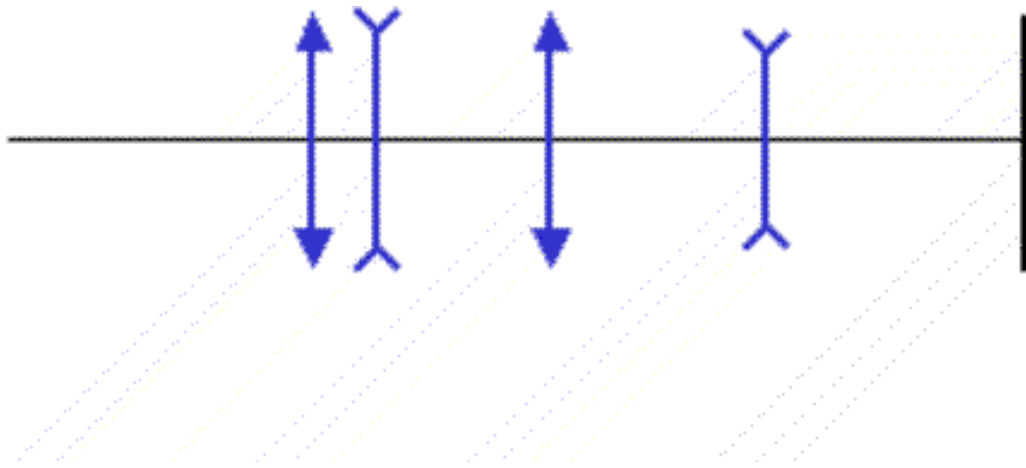
变焦或变倍原理：物像交换原则，即透镜要满足一定的共轭距可有两个位置，该二位置的放大率分别为  $\beta$  和  $1/\beta$ 。若物面一定，当透镜从一个位置向另一位置移动时，像面将发生移动，若采取补偿措施使像面不动，便构成一个变焦距系统。

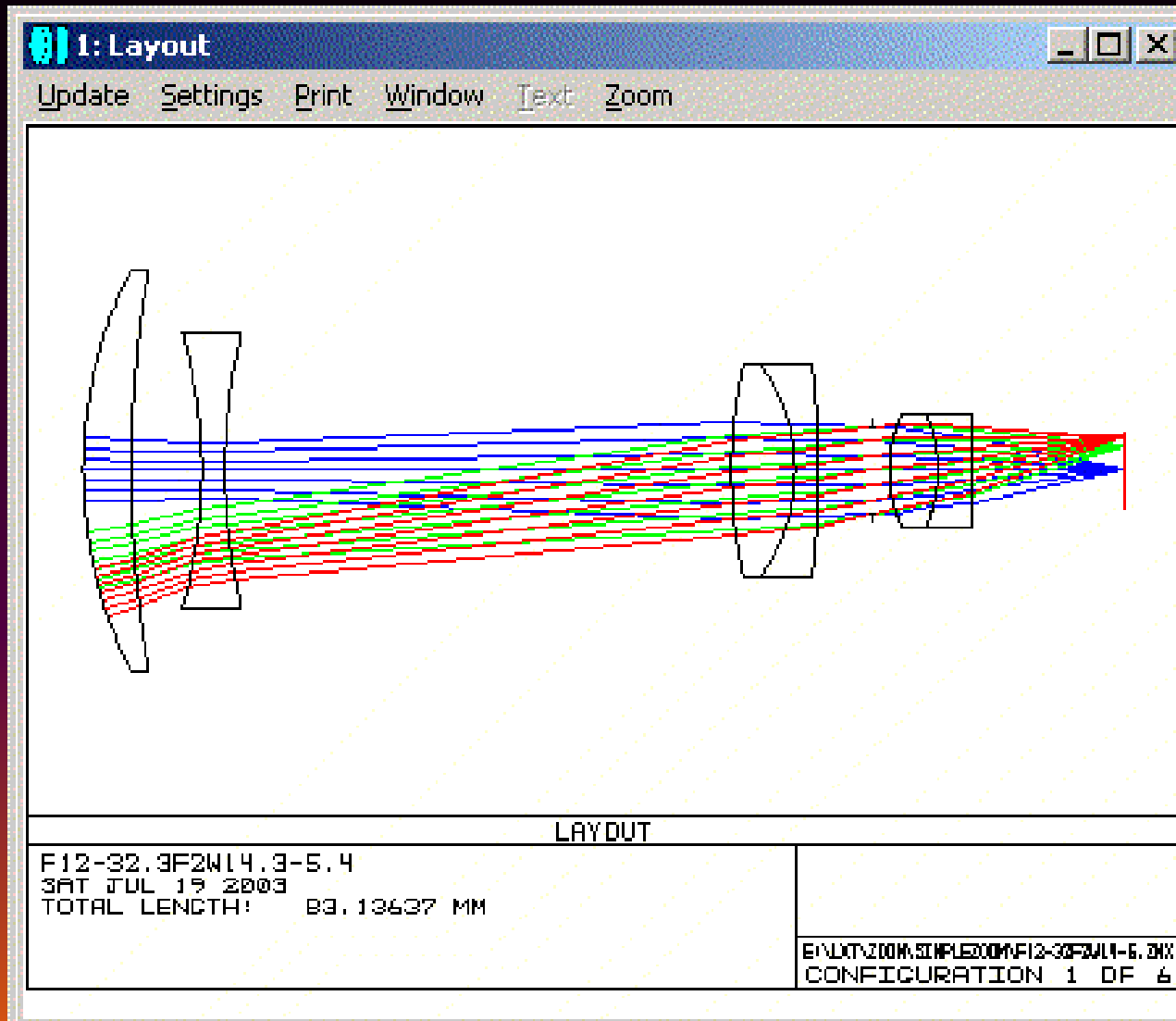


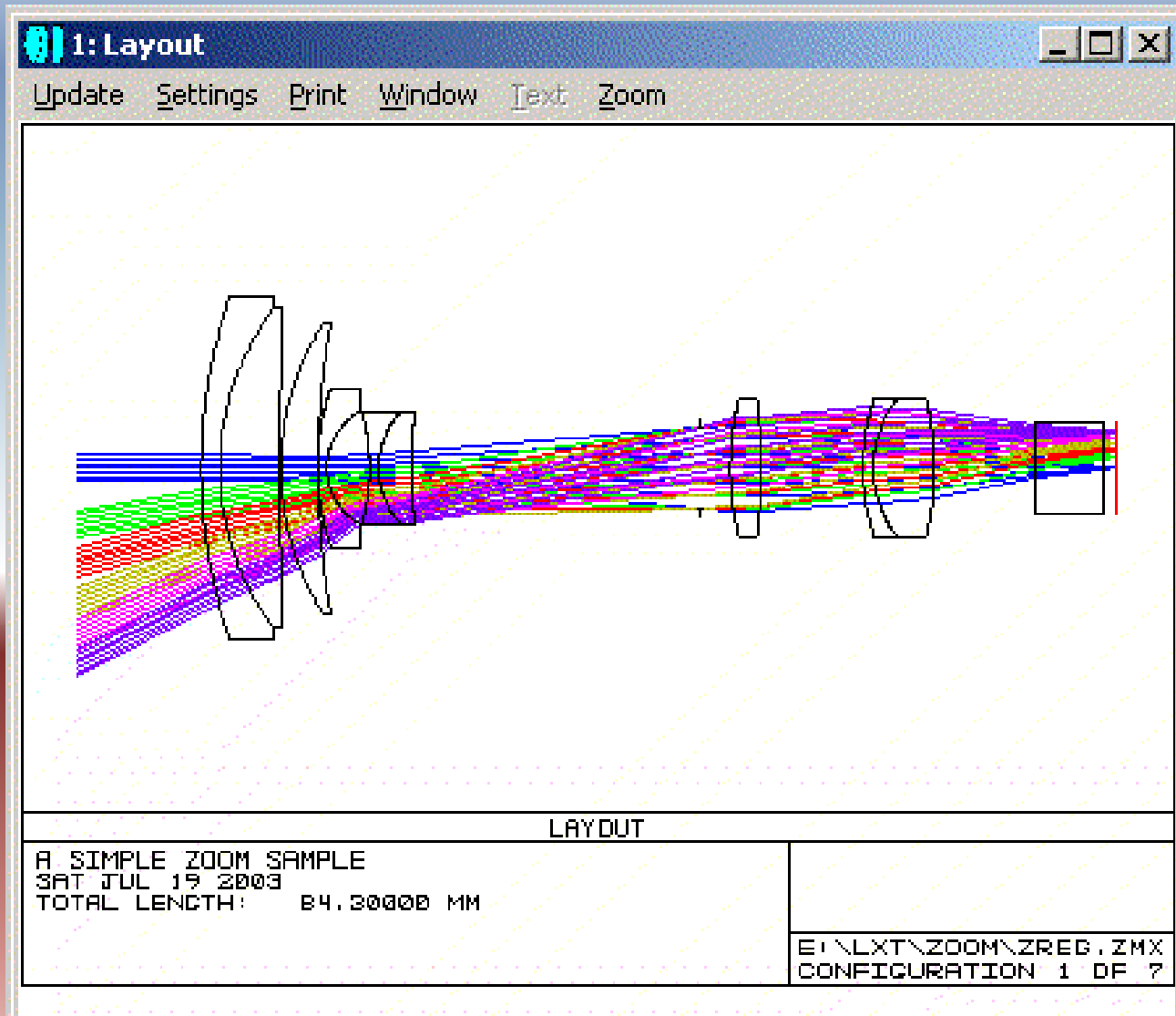
变焦补偿方式： 光学补偿      机械补偿





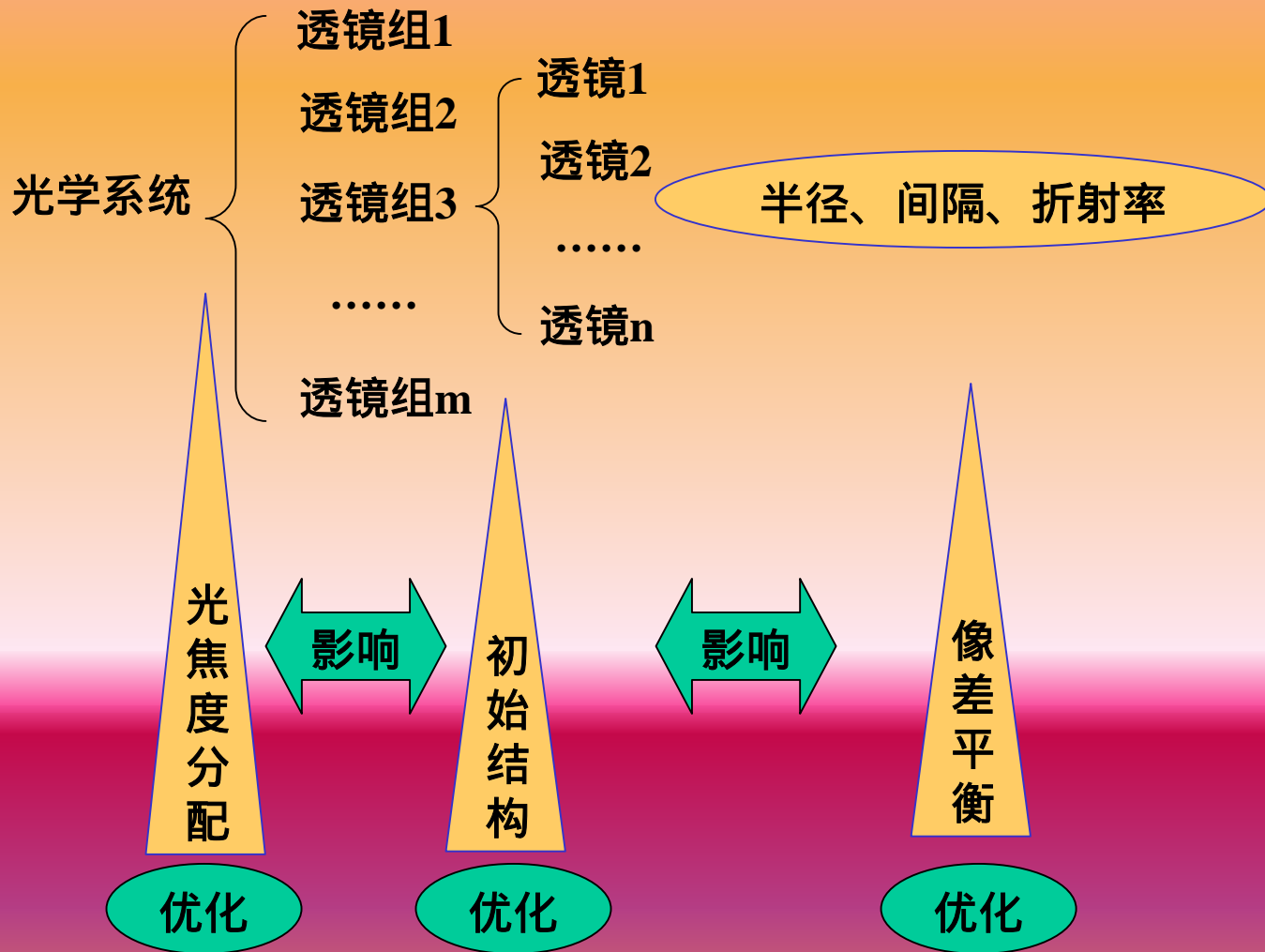








# 变焦距光学系统优化设计过程



# 变焦距系统的高斯解优化设计



**必要性：**高斯解的优化与否将影响到能否求出合适的初始结构有及能否完成像差平衡。

**可能性：**系统的最终性能可以在高斯解阶段得到一定的体现。

**关键：**找出系统的光焦度分配与系统性能之间的关系，并以适当的数学模型描述之。

变焦距光学系统的高斯解优化设计应当考虑：

1. 尽可能提高各组元的运动效率，满足最速变焦。
2. 尽可能减轻曲线运动的组元的运动非线性。
3. 变焦过程中光圈的变化量应控制在要求范围内。
4. 高斯结构长度应符合要求。
5. 各焦距位置均易于进行像差校正，结构不太复杂。

数学描述？

参阅：李晓彤，岑兆丰 Proc. of SPIE Vol.4927  
李晓彤，何国雄 浙江大学学报，1993.1



# 从初始结构到像差平衡



## 初始结构的初级像差预优化

这对于多组元的复杂光学系统是有必要的。

方案1：对各组元针对特定物距校正像差。适用于定焦系统。

方案2：对各组元进行一次初级像差预优化。适用于变焦系统。

## 像差平衡

对变焦距系统，应取3至5个焦距位置。

