



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

单色像差 { 轴上点像差 — 球差 (Spherical Aberration)
Ch 7
轴外点像差 { 彗差 (Coma)
像散 (Astigmatism)
场曲 (Field Curvature)
畸变 (Distortion)
Ch 8

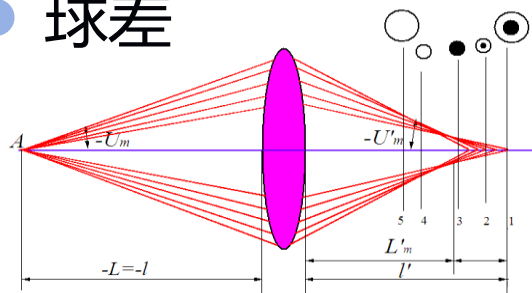
Ch 9
色像差 { 轴上点像差 --- 位置色差 (longitudinal CA)
轴外点像差 --- 倍率色差 (Lateral CA)

Ch 10 波像差：与像质评价指标和光学检测相联系；

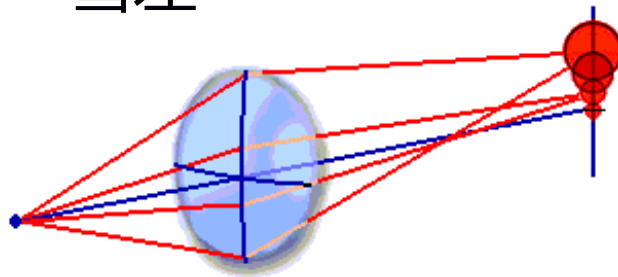
Ch 11 光线追迹-光路计算

七种像差

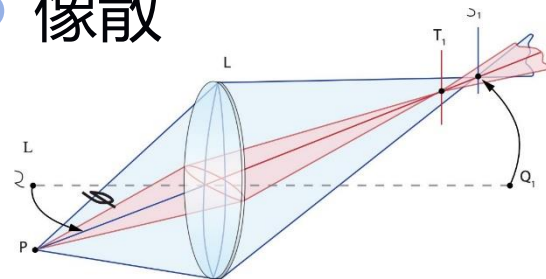
● 球差



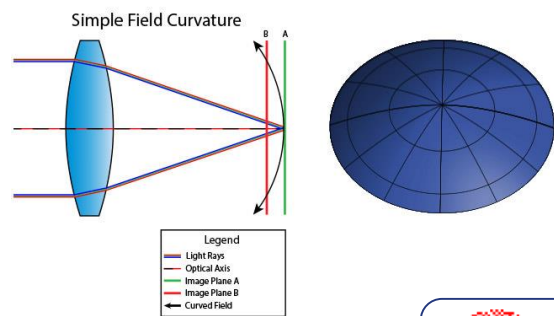
● 彗差



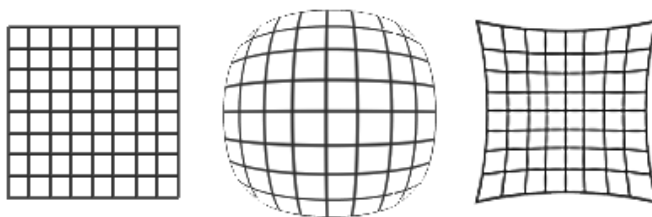
● 像散



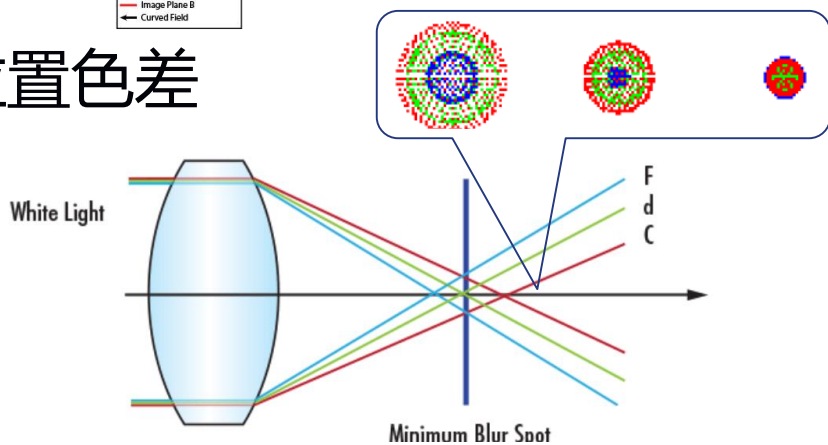
● 场曲



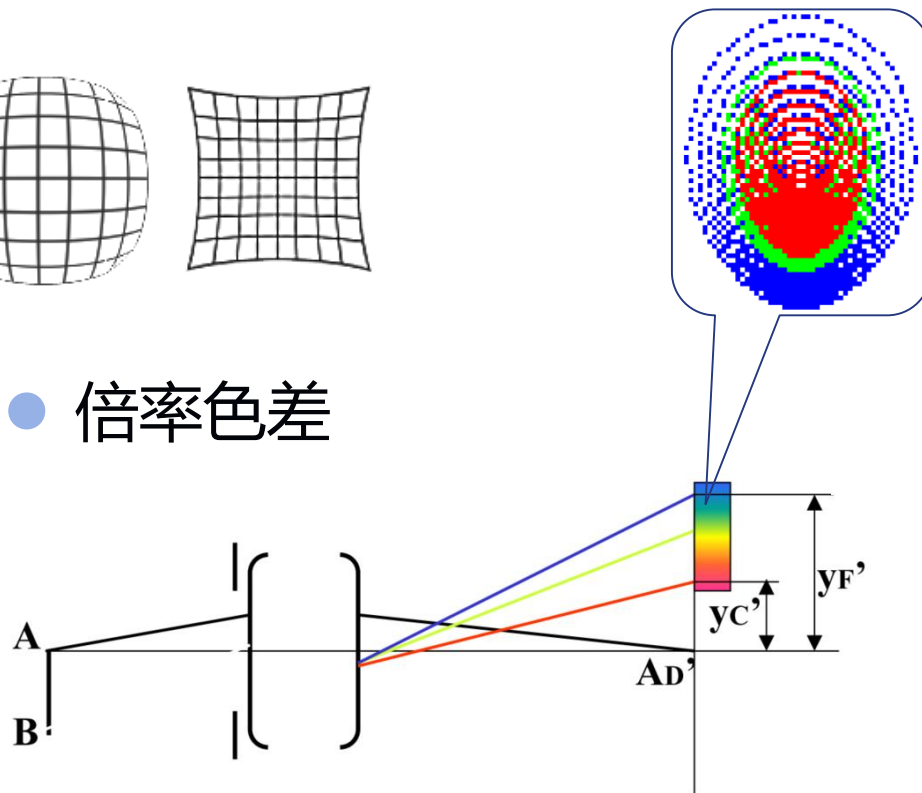
● 畸变



● 位置色差



● 倍率色差





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。



第十一章 光线追迹

任何实用的光学系统都必须经过精细设计、校正其像差以达到良好的成像质量，因此，为了获得像差的最佳校正和平衡，需要不断的修改光学结构参数和反复大量的光线光路计算，也称为**光线追迹**。

主要内容

- 11.1 概述
- 11.2 近轴光线追迹
- 11.3 子午光线追迹
- 11.4 轴外点细光束追迹
- 11.5 空间光线追迹



第十一章 光线追迹

任何实用的光学系统都必须经过精细设计、校正其像差以达到良好的成像质量，因此，为了获得像差的最佳校正和平衡，需要不断的修改光学结构参数和反复大量的光线光路计算，也称为**光线追迹**。

主要内容

- 11.1 概述
- 11.2 近轴光线追迹
- 11.3 子午光线追迹
- 11.4 轴外点细光束追迹
- 11.5 空间光线追迹



11.1 概述

一. 光线追迹

- 实际光学系统只有在近轴区才能像理想光学系统那样完善成像；近轴小物体以细光束成像的系统没有**实用意义**；
- **相对孔径和视场**这两个参数与系统的功能和使用价值密切相关，正如拉氏不变量决定了系统传输信息的大小。
- 为了获得实际光学系统中像差的最佳校正和平衡，要不断地修改结构参数，需要进行光线光路计算，了解系统像差，进行综合分析和评价，最终确定下一步的方向；
- 在这个过程中，需要反复作大量光线的光路计算，称为**光线追迹 (Ray tracing)**。



11.1 概述

二. 光学设计中的光线追迹过程

光学系统确定后，通过近轴光线光路计算可求得该系统的有关参数。

- 对视场中一物点作**近轴光线光路计算**可求得其理想像点位置；
- 过**某一孔径的实际光线光路计算**可求得其实际像点位置；
- 实际像点的坐标与理想像点坐标的**偏离**，便是相应的**像差值**；
- 如果系统的像差不符合要求，就需要修改系统中一些结构参数，**重复光路计算**，直到得到满意的结果。



11.1 概述

三. 光线光路计算

通常主要作以下光线的光路计算。

- 近轴光线的光路计算：近轴光线光路计算，最后得到像的理想状态；
- 子午面内的光线光路计算：远轴光线光路计算，最后可以得到子午面内实际光线的像差；
- 沿主光线的细光束光路计算：计算得到细光束像差，包括细光束成像的子午场曲、弧矢场曲和像散差；
- 子午面外的光线或者空间光线的光路计算：获得空间光线子午像差分量和弧矢像差分量，对系统的成像质量有着全面的了解。



第十一章 光线追迹

任何实用的光学系统都必须经过精细设计、校正其像差以达到良好的成像质量，因此，为了获得像差的最佳校正和平衡，需要不断的修改光学结构参数和反复大量的光线光路计算，也称为**光线追迹**。

主要内容

- 11.1 概述
- 11.2 近轴光线追迹
- 11.3 子午光线追迹
- 11.4 轴外点细光束追迹
- 11.5 空间光线追迹



11.2 近轴光线追迹

一. 基本参数计算

- 求高斯像的位置、大小以及光学系统的基点位置和焦距

物像位置公式: $\frac{n'}{l'} - \frac{n}{l} = \frac{n' - n}{r} \quad lu = l'u' = h = r\varphi$

阿贝不变量Q: $n\left(\frac{1}{r} - \frac{1}{l}\right) = n'\left(\frac{1}{r} - \frac{1}{l'}\right) = Q$

折射前后夹角关系: $n'u' - nu = \frac{h(n' - n)}{r}$

过渡公式:
$$\begin{cases} n_2 = n'_1, n_3 = n'_2 \dots n_k = n'_{k-1} \\ u_2 = u'_1, u_3 = u'_2, \dots u_k = u'_{k-1} \\ y_2 = y'_1, y_3 = y'_2 \dots y_k = y'_{k-1} \end{cases} \quad l_2 = l'_1 - d_1, l_3 = l'_2 - d_2 \dots, l_k = l'_{k-1} - d_{k-1}$$

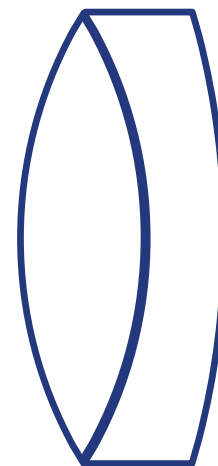


11.2 近轴光线追迹

例： 一个简单的望远镜物镜是由两块透镜胶合而成，基本参数如下（单位：mm），求它的基点位置和焦距。

```
10 — r = [62.5 -43.65 -124.35];
11 — n = [1 1.51637 1.67268];
12 — np = [1.51637 1.67268 1];
13 — d = [4 2.5];
14
15 — u = zeros(1,3); up = zeros(1,3);
16 — h = [5 0 0];
17 — for m = 1:2
18 —     up(1,m) = ((np(1,m)-n(1,m))./r(1,m).*h(1,m) + n(1,m).*u(1,m))./np(1,m);
19 —     h(1,m+1) = h(1,m)-d(1,m).*up(1,m);
20 —     u(1,m+1) = up(1,m);
21 — end
22 — m=3;
23 — up(1,m) = ((np(1,m)-n(1,m))./r(1,m).*h(1,m) + n(1,m).*u(1,m))./np(1,m);
24 — fp = h(1,1)./up(1,3);
```

$$\begin{array}{lll} n'_1 = 1 & & \\ r_1 = 62.5 & d_1 = 4.0 & n'_1 = n_2 = 1.51637 \\ r_2 = -43.65 & d_2 = 2.5 & n'_2 = n_3 = 1.67268 \\ r_3 = -600 & & n'_3 = 1 \end{array}$$





11.2 近轴光线追迹

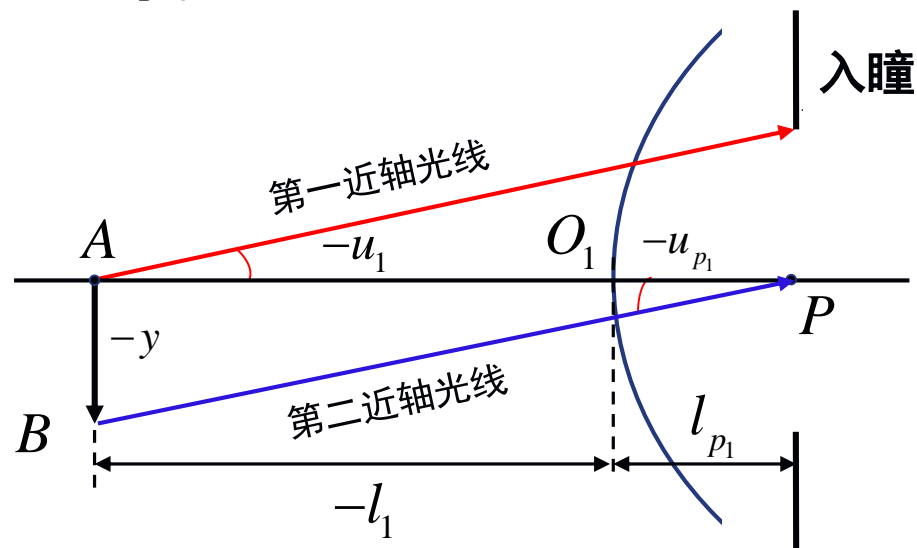
二. 轴上点近轴光线的光路计算

- **第一近轴光线**：轴上物点A发出、过入瞳边缘。

$$i = \frac{l-r}{r} u; \quad i' = \frac{n}{n'} i$$

$$u' = u + i - i'; \quad l' = r(1 + \frac{i'}{u'})$$

$$lu = l'u' = h = r\varphi$$



- 给出物距 l 和孔径角 u 便可求出像距 l' 和像方孔径角 u' ;
- 角 u 可以在近轴范围内任意取值，计算时，角 u 常对入射光瞳的边缘光线取值，即所谓的**第一近轴光线**。

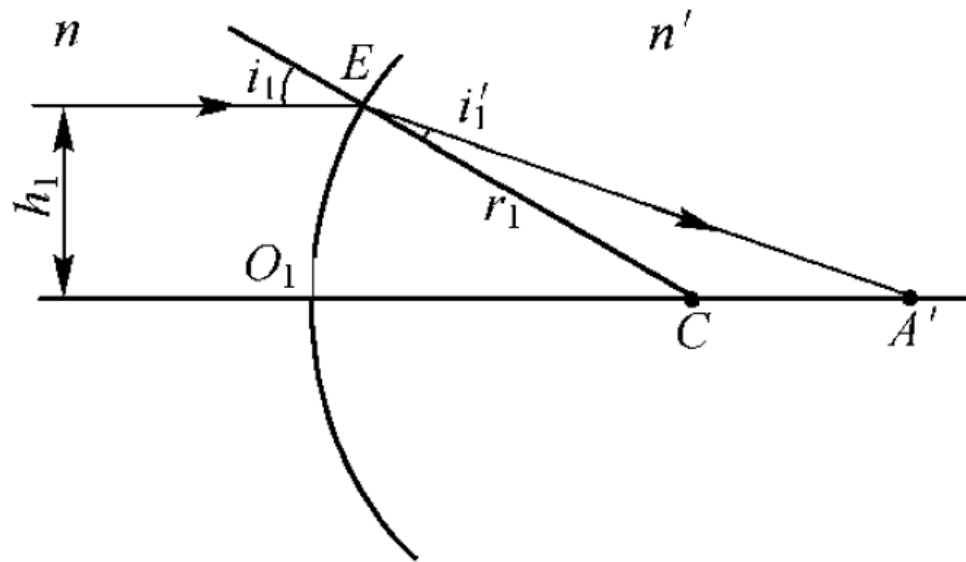
11.2 近轴光线追迹

二. 轴上点近轴光线的光路计算

- 对于 k 个折射面的光学系统做计算时，采用下面的过渡公式：

$$\begin{cases} n_2 = n'_1, n_3 = n'_2, \dots, n_k = n'_{k-1} \\ u_2 = u'_1, u_3 = u'_2, \dots, u_k = u'_{k-1} \\ y_2 = y'_1, y_3 = y'_2, \dots, y_k = y'_{k-1} \end{cases}$$

$$l_2 = l'_1 - d_1, l_3 = l'_2 - d_2, \dots, l_k = l'_{k-1} - d_{k-1}$$



- 当物体在无限远，即 $l_1 = -\infty$, $u_1 = 0$, 此时用光线入射高度作为初始数据，如上图所示 $i_1 = h_1 / r_1$, h_1 可以任意选择，**但对于第一近轴光线**，取入射光瞳的半径。

校对公式：

$$lu = l'u' = h = r\varphi$$



11.2 近轴光线追迹

二. 轴上点近轴光线的光路计算

- 双胶合透镜光学系统结构如下： p63

r/mm	d/mm	n_D	n_F	n_C	dn	玻璃
62.5						
-43.65	4.0	1.51633	1.52196	1.51389	0.00806	K9
-124.35	2.5	1.67270	1.68746	1.66399	0.02087	ZF2

第一近轴光线： $l_1 = \infty, u_1 = 0, h_1 = 10;$

根据第一近轴光线
光路计算结果：

$$f' = h_1 / u_3' = 10 / 0.100104 = 99.8961$$

$$J = -n_1 h_1 u_1 = -1 \times 10 \times (-0.052336) = 0.52336;$$



11.2 近轴光线追迹

二. 轴上点近轴光线的光路计算

$$i = \frac{l - r}{r} u;$$

$$i' = \frac{n}{n'} i$$

$$u' = u + i - i';$$

$$l' = r(1 + \frac{i'}{u'})$$

$$lu = l'u' = h = r\varphi$$

表 8.1 第一近轴光线光路计算举例

	1	2	3	
l	∞	179.547	341.467	
$-r$	62.5	-43.65	-124.35	
$l-r$				
$\times u$	$h_1=10$	223.197	465.817	
$\div r$				
i	0.160 000	-0.278 585	-0.106 533	
$\times n/n'$	1/1.516 33	1.516 33/1.672 70	1.672 70	
i'	0.105 518	-0.252 542	-0.178 198	
$\times r$				
$\div u' = (u + i - i')$	0.054 482	0.028 439	0.100 104	
$l' - r$	121.047	387.617	221.359	
$+r$	62.5	-43.65	-124.35	
l'	183.547	343.967	97.009	
lu				
$\div u'$	10	9.782 07	9.710 97	
l'	183.547	343.967	97.009	
$-d$	4.0	2.5		
l	179.547	341.467		
$Lumi$	1.600 00	4.132 210	1.730 475	
$\times l' - u$	0.105 518	-0.307 024	-0.206 637	
$\times l - i'$	0.054 482	-0.026043	0.071 665	Σ
S_I	0.009 198 13	-0.0330 404	0.002 562 60	0.001 783 7
S_{II}	0.002 969 95	0.003 857 60	-0.007 285 55	-0.000 458 0
S_{III}	0.000 958 96	-0.000 450 39	0.002 071 3	0.002 579 87
$J^2(n' - u)$				
$\div n' n$	0.093 268 5	0.016 886 6	-0.011 015 5	
$\div r$				
S_{IV}	0.001 492 3	-0.000 386 86	0.000 885 85	0.001 991 29
S_V	0.000 791 477	0.000 097 75	-0.000 840 73	0.002 579 87
$i_k \div i$	0.322 886	-0.116 753	-0.284 303	
$dn \div n$	0.005 315 46	0.007 161 34	-0.012 476 8	
C_I	0.008 504 74	-0.029 592 2	0.021 590 8	0.000 503 37
C_{II}	0.002 746 06	0.003 45 50	-0.006 138 3	0.000 062 8



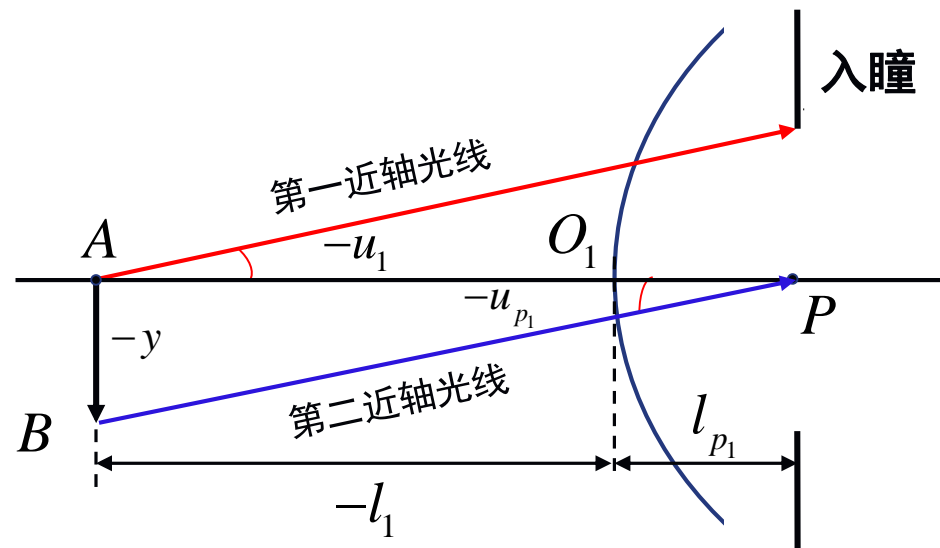
11.2 近轴光线追迹

三. 轴外点近轴光线的光路计算

- 第二近轴光线：物面边缘点B发出、过入瞳中心P。

$$u_{p_1} = \frac{y}{l_{p_1} - l_1}$$

- 像高： $y' = (l'_{p_1} - l'_1) u'_{p_1}$



l_1 和 l'_1 为物距和第一近轴光线求得的高斯像面位置。



11.2 近轴光线追

● 第二近轴光线 光路计算举例

$$i = \frac{l - r}{r} u;$$

$$i' = \frac{n}{n'} i$$

$$u' = u + i - i';$$

$$l' = r(1 + \frac{i'}{u'})$$

$$lu = l'u' = h = r\varphi$$

	1	2	3
l	0.080 52	-2.787 1	-5.554 4
$-r$	62.5	-43.65	-124.35
$l-r$	-61.694 8	40.862 9	118.795 6
$\times u$			
$\div r$			
i	0.051 661 7	0.032 526 0	0.030 287 7
$\times n/n'$	1/1.516 33	1.516 33/1.672 70	1.672 70
i'	0.034 070 2	0.029 485 3	0.050 662 2
$\times r$			
$\div u' = (u + i - i')$	0.034 744 5	-0.031 703 8	-0.052 783
$l' - r$	-61.287 1	40.595 5	120.969
$+r$	62.5	-43.65	-124.35
l'	1.212 9	-3.054 5	-3.381
iu	-0.042 140 2	0.096 836 4	0.176 096
$\div u'$			
l'	1.212 9	-3.054 4	-3.381 3
$-d$	4	2.5	
l	-2.787 1	-5.554 4	
$luni$			
$\times i' - u$	-0.002 177 03	0.004 775 98	0.008 921 41
$\times i - i'$			
S_I			
S_{II}			
S_{III}			
$J^2(n' - u)$			
$\div n'n$			
$\div r$			
S_{IV}			
S_V			
$I_z \div I$	0.322 886	-0.116 754	-0.284 303
$dn \div n$	0.005 315 46	0.007 161 34	-0.012 476 8
C_I	-0.000 011 57	0.000 034 20	-0.000 111 31
C_{II}	-0.000 035 84	-0.000 292 94	0.000 391 52



第十一章 光线追迹

任何实用的光学系统都必须经过精细设计、校正其像差以达到良好的成像质量，因此，为了获得像差的最佳校正和平衡，需要不断的修改光学结构参数和反复大量的光线光路计算，也称为**光线追迹**。

主要内容

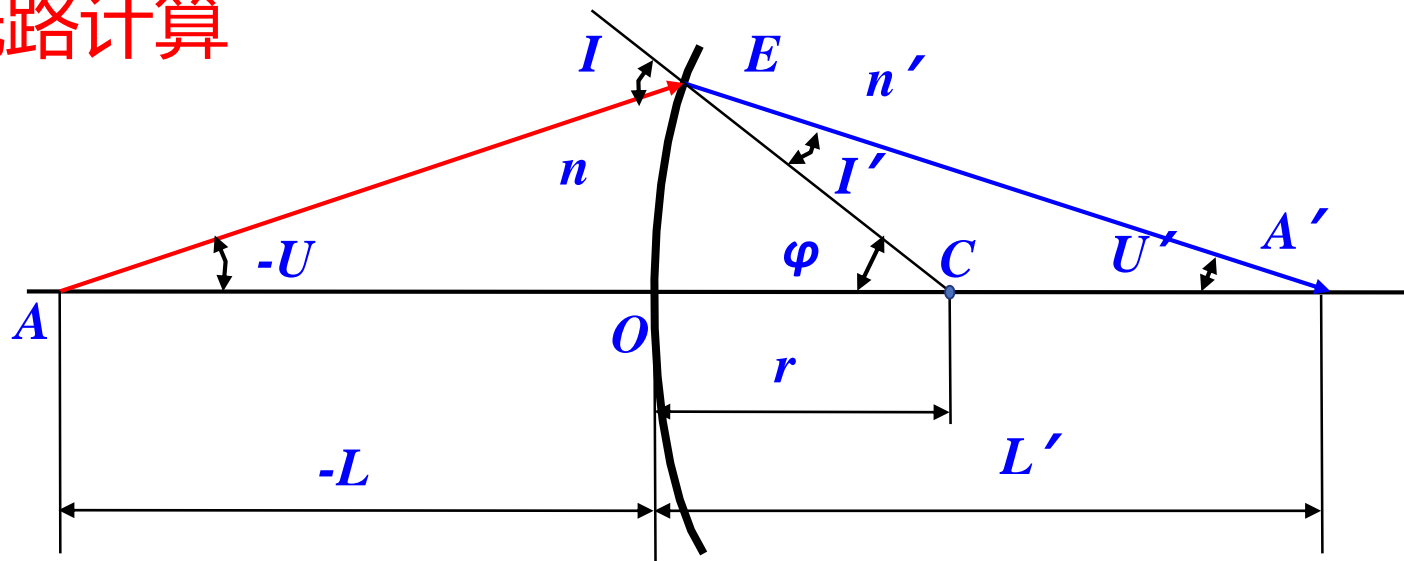
- 11.1 概述
- 11.2 近轴光线追迹
- 11.3 子午光线追迹
- 11.4 轴外点细光束追迹
- 11.5 空间光线追迹



11.3 子午光线追迹

一. 轴上点远轴光线光路计算

$$\begin{cases} \sin I = \frac{L-r}{r} \sin U \\ \sin I' = \frac{n}{n'} \sin I \\ U' = U + I - I' \\ \sin I' = \frac{L'-r}{r} \sin U' \end{cases}$$



$U = 0$ 时, $\sin I = h / r$ 过渡公式 $\begin{cases} U_2 = U'_1, U_3 = U'_2, \dots, U_k = U'_{k-1} \\ L_2 = L'_1 - d_1, L_3 = L'_2 - d_2, \dots, L_k = L'_{k-1} - d_{k-1} \end{cases}$

- 计算的初始数据为 L_1, U_1 ，最后结果为 L'_k, U'_k 。
- 物体处于不同位置处，各光线具有不同的初始数据。
- 用大 L 公式进行光路追迹确定像方截距和像方孔径角。

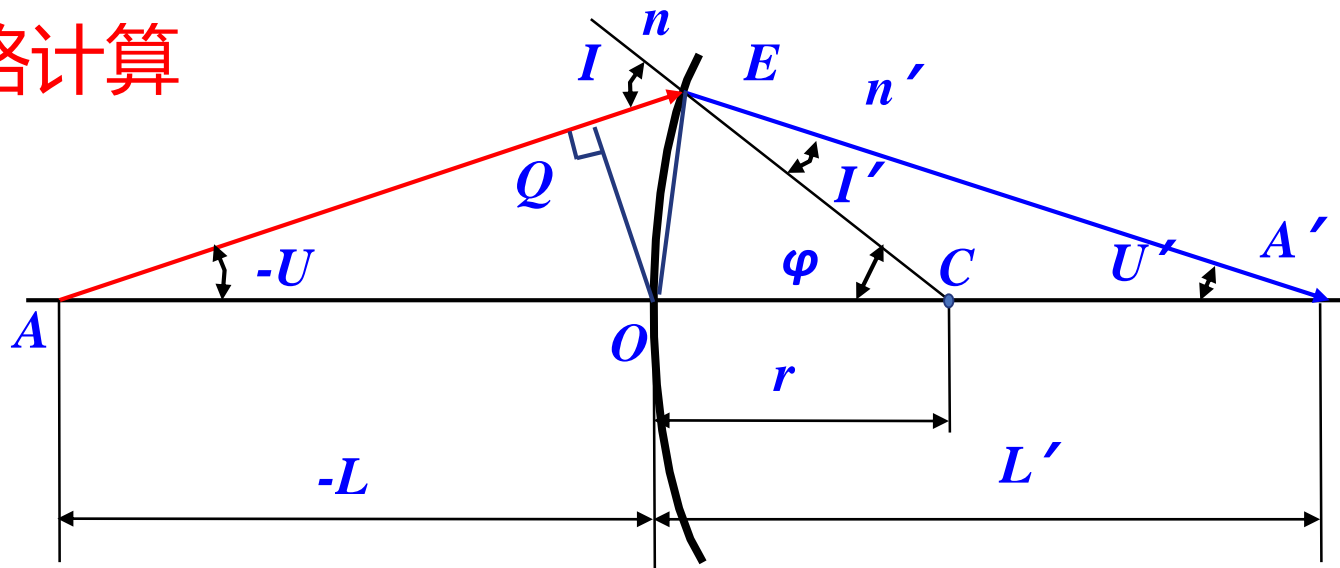


11.3 子午光线追迹

一. 轴上点远轴光线光路计算

$$OE = \frac{OQ}{\cos \angle QOE}$$

$$= \frac{L \sin U}{\cos \angle QOE}$$



$$\angle QOE = \angle QOC - \angle EOC$$

$$= (90^\circ - U) - \left(90^\circ - \frac{U + I}{2}\right)$$

$$= \frac{I - U}{2}$$

$$OE = \frac{L \sin U}{\cos \frac{1}{2}(I - U)}$$



$$OE = \frac{L' \sin U'}{\cos \frac{1}{2}(I' - U')}$$

校对公式:

$$L' = OE \frac{\cos \frac{1}{2}(I' - U')}{\sin U'} = \frac{L \sin U}{\cos \frac{1}{2}(I - U)} \frac{\cos \frac{1}{2}(I' - U')}{\sin U'}$$



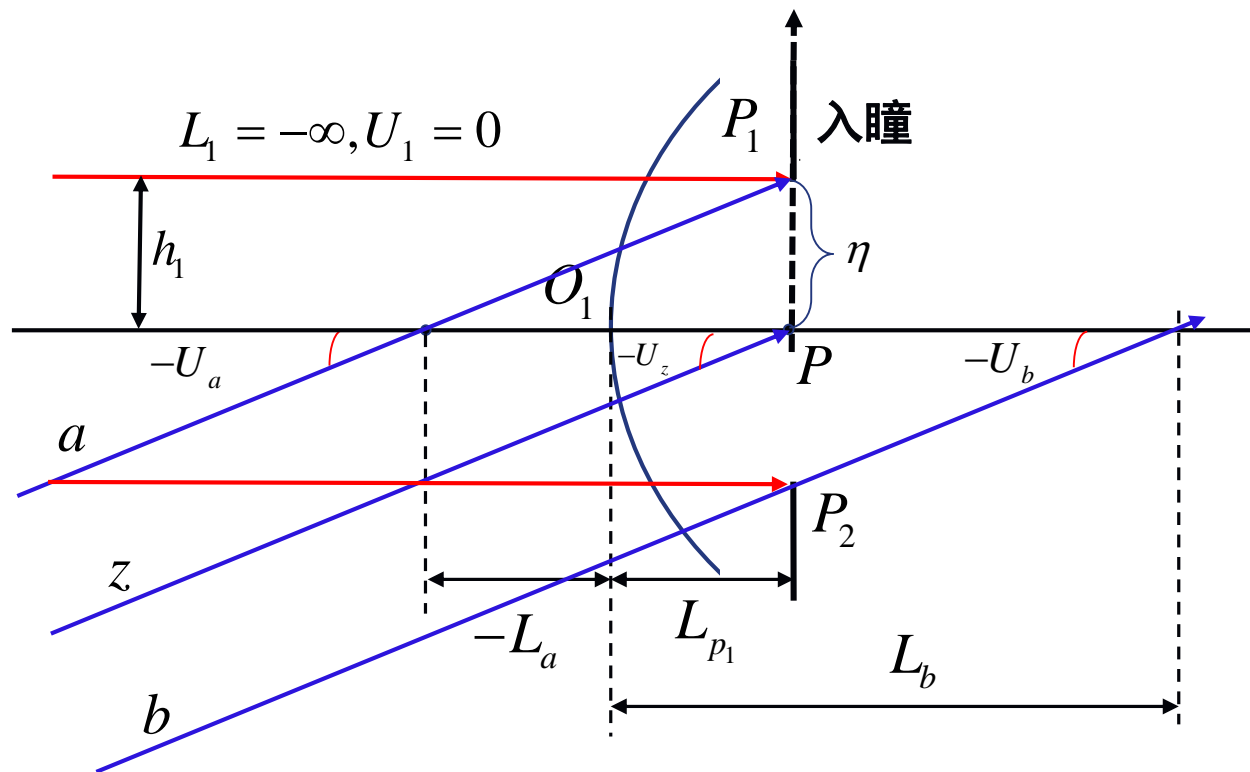
11.3 子午光线追迹

二. 轴外点子午面内的光路计算

(1) 物体位于无限远

轴上点初始数据: $L_1 = -\infty, U_1 = 0$

光线离轴高度: $h_1 = \eta$



轴外点初始数据:
$$\begin{cases} \text{上光线 } U_a = U_z, L_a = L_{p_1} + \frac{\eta}{\tan U_z} \\ \text{主光线 } U_z = U_z, L_{p_1} \\ \text{下光线 } U_b = U_z, L_b = L_{p_1} - \frac{\eta}{\tan U_z} \end{cases}$$

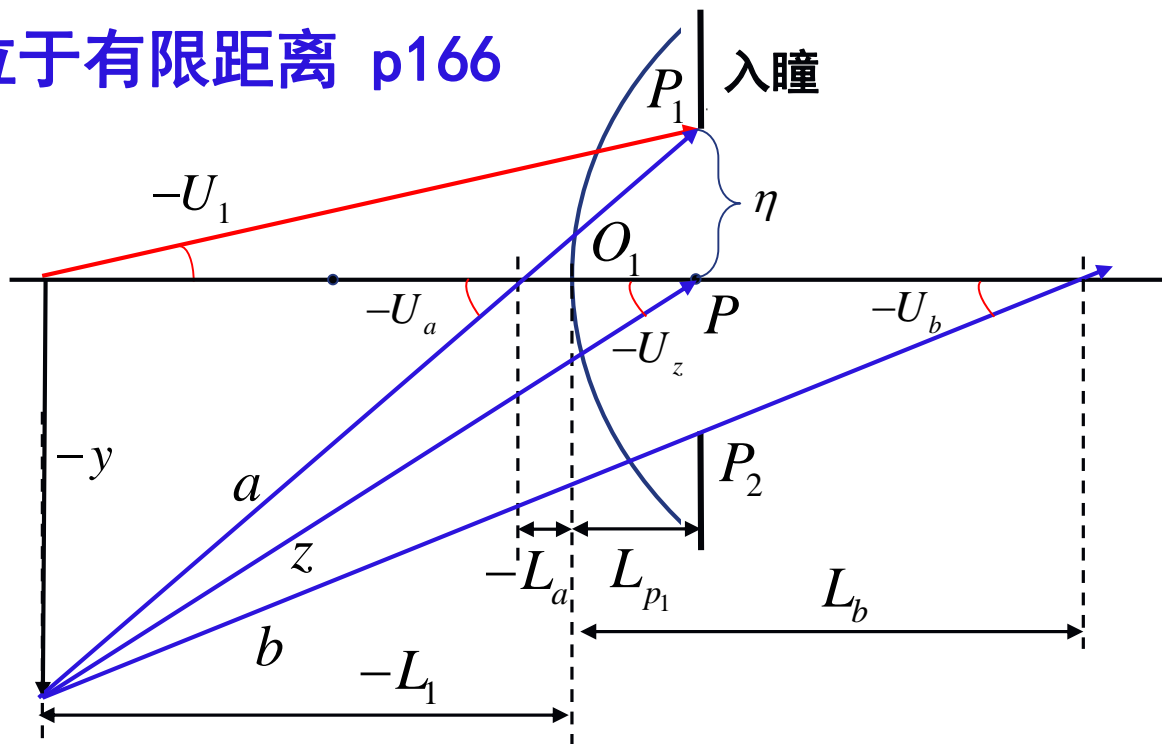
例如: 望远物镜、摄影物镜等



11.3 子午光线追迹

二. 轴外点子午面内的光路计算

(2) 物体位于有限距离 p166



$$\left\{ \begin{array}{l} \text{上光线} \quad \tan U_a = \frac{y - \eta}{L_{p_1} - L_1}, \\ \quad \quad \quad L_a = L_{p_1} + \frac{\eta}{\tan U_z}, \\ \text{主光线} \quad \tan U_z = \frac{y}{L_{p_1} - L_1}, \\ \quad \quad \quad L_{p_1} \\ \text{下光线} \quad \tan U_b = \frac{y + \eta}{L_{p_1} - L_1}, \\ \quad \quad \quad L_b = L_{p_1} - \frac{\eta}{\tan U_z} \end{array} \right.$$

- 初始数据确定后 L_1, U_1 , 可按公式计算最后得到 L'_k, U'_k 。

$$\text{入射光瞳半径: } \eta = -(L_{p_1} - L_1) \tan U_1$$



11.3 子午光线追迹

二. 轴外点子午面内的光路计算

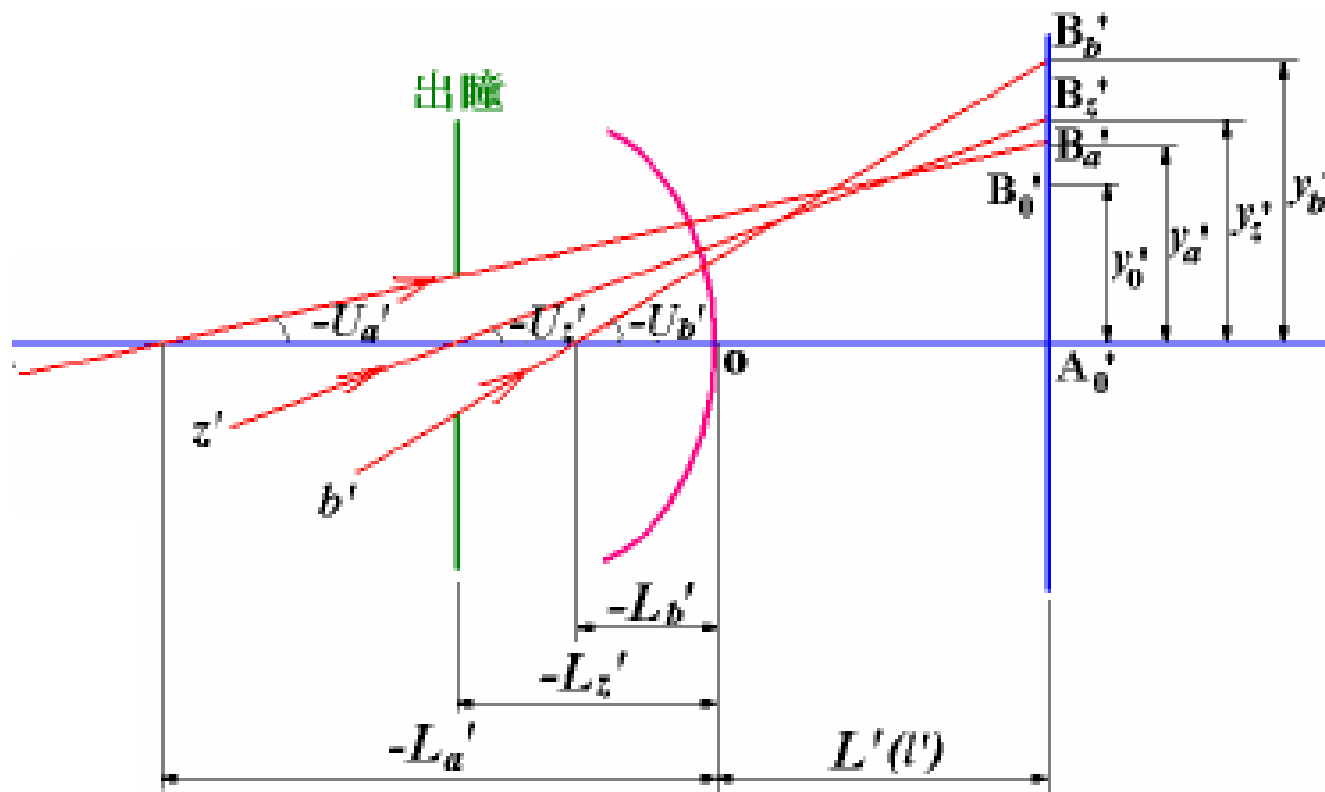
轴外点远轴光线(只考虑主光线和上、下光线)

按照“轴上点远轴光线”用大 L 公式进行光路追迹确定像方截距和像方孔径角:

$$\begin{cases} \text{由 } (L_a, U_a) \Rightarrow (L'_a, U'_a) \\ \text{由 } (L_z, U_z) \Rightarrow (L'_z, U'_z) \\ \text{由 } (L_b, U_b) \Rightarrow (L'_b, U'_b) \\ \text{由 } (L, U) \Rightarrow (L', U') \end{cases}$$

实际像高:

$$\begin{cases} \text{上光线: } y'_a = (L'_a - L') \tan U'_a \\ \text{主光线: } y'_z = (L'_z - L') \tan U'_z \\ \text{下光线: } y'_b = (L'_b - L') \tan U'_b \end{cases}$$

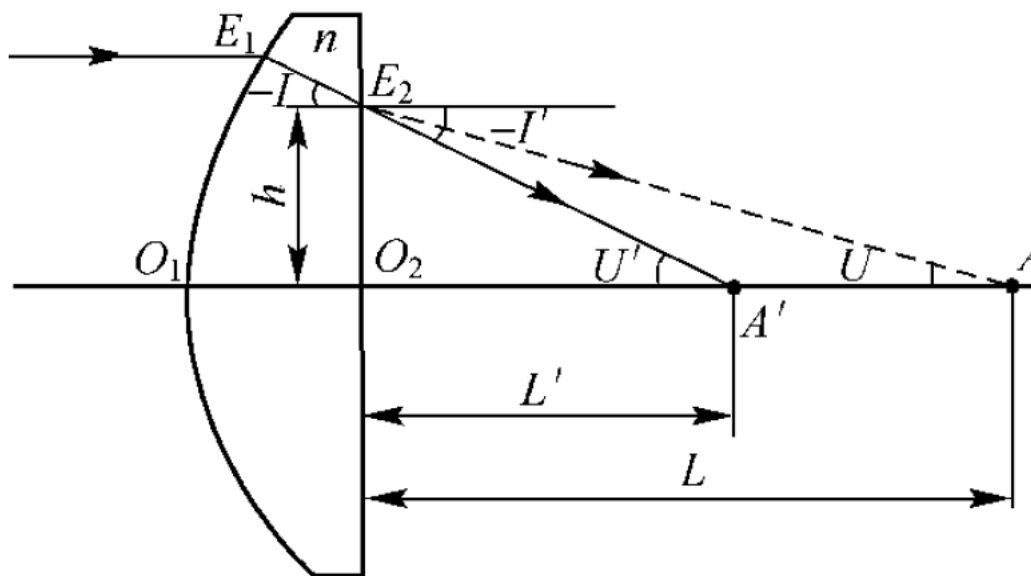




11.3 子午光线追迹

三. 光线经过平面时的光路计算

$$\begin{cases} I = -U, & \sin I' = \frac{n}{n'} \sin I' \\ U' = -I', & L' = L \frac{\tan U}{\tan U'} \end{cases}$$



当角U很小时，上式可以化简为：

$$L' = L \frac{\tan U}{\tan U'} = L \frac{\sin U \cos U'}{\cos U \sin U'} = L \frac{n' \cos U'}{n \cos U}$$



11.3 子午光线追迹

三. 光线经过平面时的光路计算

折射平面的近轴光的光路计算

$$\left\{ \begin{array}{l} i = -u, \\ u' = -i', \end{array} \right. \quad \left\{ \begin{array}{l} i' = \frac{n}{n'} i = -\frac{n}{n'} u \\ l' = l \frac{u}{u'} = l \frac{n'}{n} \end{array} \right. \quad \leftarrow \quad \left\{ \begin{array}{l} I = -U, \\ U' = -I', \end{array} \right. \quad \left\{ \begin{array}{l} \sin I' = \frac{n}{n'} \sin I \\ L' = L \frac{\tan U}{\tan U'} \end{array} \right.$$

折射平面近轴光计算的校对公式对折射平面仍可用。



第十一章 光线追迹

任何实用的光学系统都必须经过精细设计、校正其像差以达到良好的成像质量，因此，为了获得像差的最佳校正和平衡，需要不断的修改光学结构参数和反复大量的光线光路计算，也称为**光线追迹**。

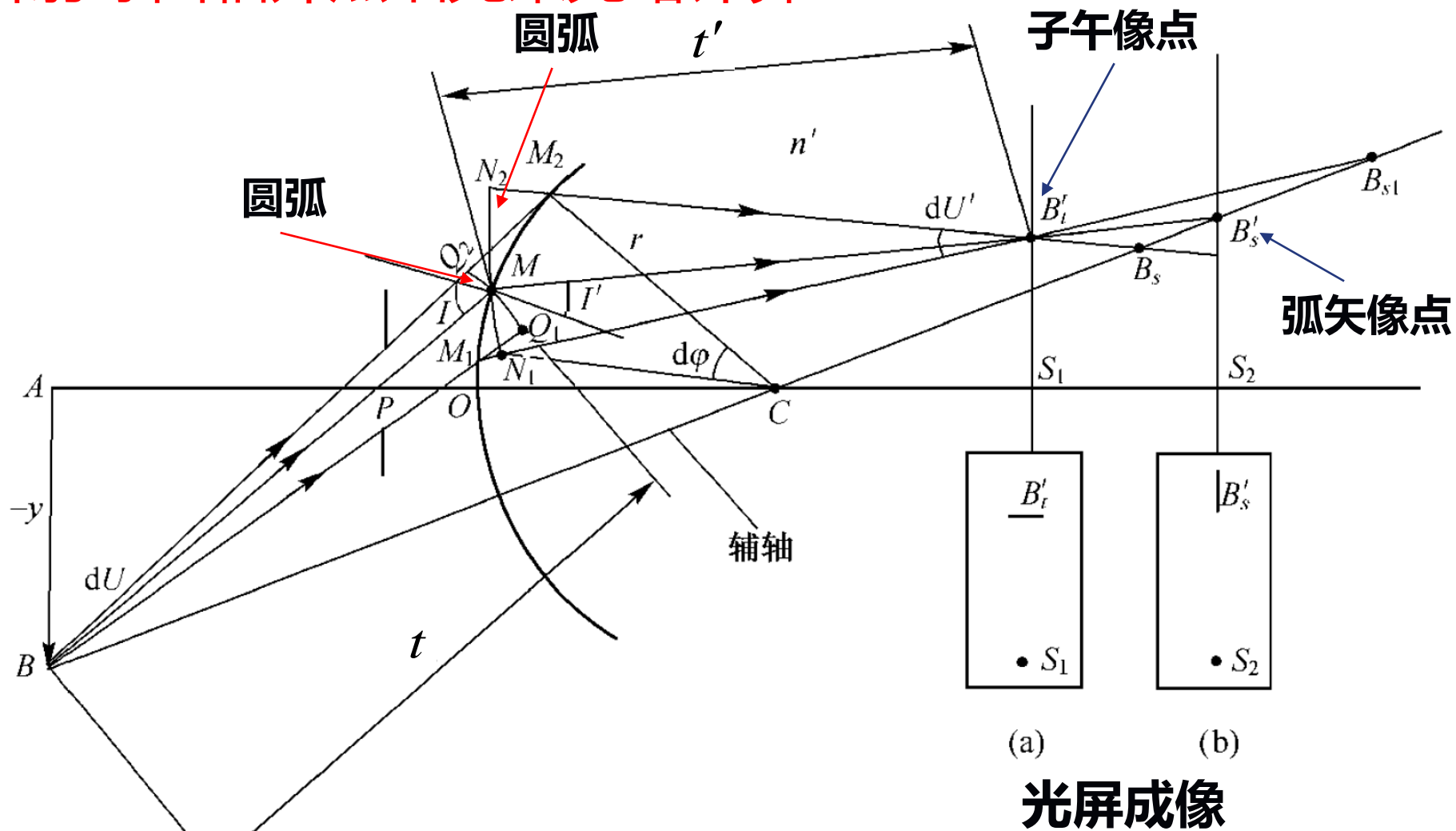
主要内容

- 11.1 概述
- 11.2 近轴光线追迹
- 11.3 子午光线追迹
- 11.4 轴外点细光束追迹
- 11.5 空间光线追迹



11.4 轴外点细光束追迹

一. 单折射球面轴外点细光束光路计算





11.4 轴外点细光束追迹

一. 单折射球面轴外点细光束光路计算

研究子午细光束和弧矢细光束的成像情况

计算细光束像散用的公式称为杨氏公式。

$$\frac{n' \cos^2 I'}{t'} - \frac{n \cos^2 I}{t} = \frac{n' \cos I' - n \cos I}{r}$$
$$\frac{n'}{s'} - \frac{n}{s} = \frac{n' \cos I' - n \cos I}{r}$$

如果 $I = I' = 0$ ，将得到与轴上点近轴光线的球面成像公式。

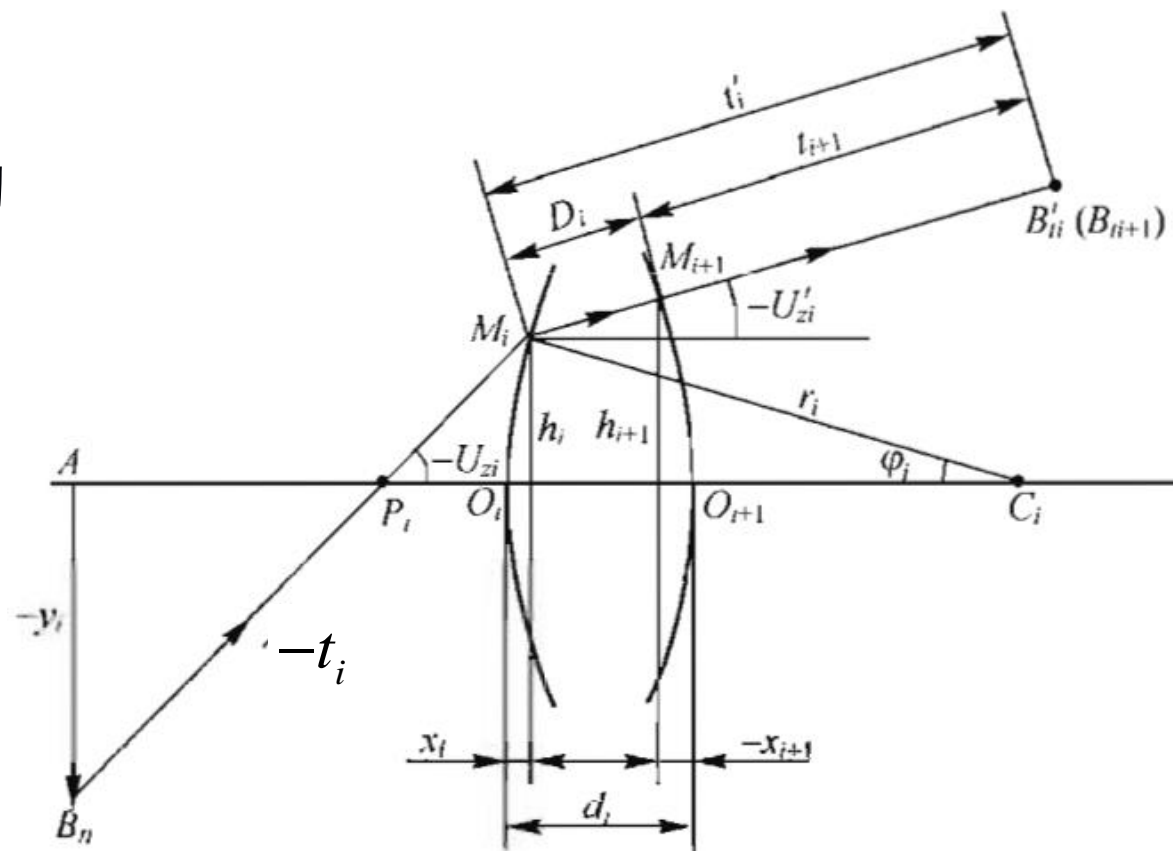
$$\frac{n'}{t'} - \frac{n}{t} = \frac{n' - n}{r}, \quad \frac{n'}{s'} - \frac{n}{s} = \frac{n' - n}{r}$$



11.4 轴外点细光束追迹

二. 光学系统轴外点细光束光路计算

- 计算像散光束时，必须先进行主光线的光路计算，以获得入射角和折射角；
- 子午和弧矢像点均在主光线上，
当一个折射面向下一个折射面过渡时，必须沿着主光线进行计算。



具体见课本 p171，自学。



第十一章 光线追迹

任何实用的光学系统都必须经过精细设计、校正其像差以达到良好的成像质量，因此，为了获得像差的最佳校正和平衡，需要不断的修改光学结构参数和反复大量的光线光路计算，也称为**光线追迹**。

主要内容

- 11.1 概述
- 11.2 近轴光线追迹
- 11.3 子午光线追迹
- 11.4 轴外点细光束追迹
- 11.5 空间光线追迹



11.5 空间光线追迹

空间光线 (skew ray) : 自物空间轴外一点向光学系统投射的光束中, 绝大多数光线不在子午面内, 这些光线即为空间光线;

自学了解 p172-p177



第十一章 光线追迹

任何实用的光学系统都必须经过精细设计、校正其像差以达到良好的成像质量，因此，为了获得像差的最佳校正和平衡，需要不断的修改光学结构参数和反复大量的光线光路计算，也称为**光线追迹**。

主要内容

- 11.1 概述
- 11.2 近轴光线追迹
- 11.3 子午光线追迹
- 11.4 轴外点细光束追迹
- 11.5 空间光线追迹



第十一章 光线追迹

概述

- 光线追迹
- 光线追迹过程
- 光线光路计算

近轴光线追迹

- 基本参数计算
- 轴上点光线的光路计算
- 轴外点光线的光路计算

子午光线追迹

- 轴上点远轴光线光路计算
- 轴外点子午面内光路计算
- 光线经过平面的光路计算

第十一章 光线追迹

轴外点细光束追迹

- 单折射球面轴外点细光束光路计算
- 光学系统轴外点细光束光路计算

空间光线追迹

- 空间光线追迹

