

常用符号表

<p>B——亮度 sb</p> <p>C——光在真空中的速度 m/s</p> <p>E_0——电磁波的振幅 V/m</p> <p>E——照度 ph</p> <p>E——原子或分子的能级 eV</p> <p>F——焦点</p> <p>F——光通量 lm</p> <p>f——时间频率 Hz</p> <p>H——主点</p> <p>I——光强度 W/m^2</p> <p>i_1——入射角 °</p> <p>i_2——折射角 °</p> <p>i_1'——反射角 °</p> <p>K——波数 c/mm</p> <p>k——空间角频率 rad/mm</p> <p>n——折射率</p>	<p>P——偏振度</p> <p>R——曲率半径 mm</p> <p>R——面发光度 lm/m^2</p> <p>T——周期 s</p> <p>t——振幅透射率</p> <p>v——光在介质中的位相速度 m/s</p> <p>Y——物高 mm</p> <p>Y'——象高 mm</p> <p>α——轴向放大率</p> <p>β——垂轴放大率</p> <p>γ——角放大率</p> <p>λ——光的波长 Å</p> <p>ρ——反射率</p> <p>Σ——波面</p> <p>τ——透射率</p> <p>τ——能级寿命、弛豫时间、相干时间 s</p>
---	---

第9篇 光 学

目 录

常用符号表

第1章 光的基本性质

1 光波	9-1
2 光子	9-2
3 光的传播	9-2
4 光的反射和折射	9-2
4.1 反射定律和折射定律	9-2
4.2 反射率和折射率	9-3
4.3 全反射现象	9-3
5 光的吸收	9-3
6 光的色散	9-4
7 光的散射	9-4

第2章 几何光学

1 理想光学系统的成象	9-4
1.1 符号规则	9-5
1.2 单个折射球面的物象位置关系式	9-5
1.3 基点和基面	9-5
1.4 理想光学系统基本公式	9-6
1.5 近轴光线光路计算	9-7
2 实际光学系统的成象和象差	9-8
2.1 子午不变式和弧矢不变式	9-8
2.2 实际光学系统的光路计算	9-8
2.3 玻璃平板的初级象差公式	9-11
2.4 光学系统中成象光束的选择	9-11
2.5 光学系统的分辨率	9-11
2.6 象差的容许限度	9-12
3 光学系统的光能	9-12
3.1 光谱灵敏度、视见函数	9-12
3.2 象平面的照度和照度分布	9-13
3.3 光学系统中光能的损失	9-13
3.4 照相物镜的光圈数	9-13
4 典型光学系统	9-14

4.1 视角鉴别率	9-14
4.2 双眼立体视觉	9-14
4.3 视放大率	9-14
4.4 放大镜	9-15
4.5 望远系统和它的物镜与场镜	9-15
4.6 显微系统和显微物镜	9-15
4.7 目镜	9-16
4.8 照相物镜	9-18
4.9 照明系统	9-19
4.10 光学玻璃牌号和性能	9-20

第3章 光的干涉

1 光的干涉现象	9-24
1.1 干涉场的强度分布	9-24
1.2 强度的极值条件	9-24
1.3 条纹的间距	9-24
2 相干光波的实现	9-25
2.1 分波前法	9-25
2.2 分振幅法	9-25
3 等厚干涉与等倾干涉	9-25
4 双光束干涉与多光束干涉	9-26
5 典型干涉仪	9-26
5.1 迈克尔逊干涉仪	9-26
5.2 马赫-陈德尔干涉仪	9-27
5.3 法卜利-白洛干涉仪	9-27
6 条纹的可见度及其影响因素	9-27
6.1 两束光强度不同的影响	9-27
6.2 光源时间相干性的影响	9-27
6.3 光源空间相干性的影响	9-28
6.4 其它影响可见度的因素	9-28
7 光学薄膜原理	9-28
7.1 透光膜	9-28
7.2 反光膜	9-28

9-II 目 录

7.3 析光膜9-28

第4章 光的衍射

- 1 衍射公式9-29
- 2 夫琅和斐衍射9-29
 - 2.1 单缝衍射9-29
 - 2.2 圆孔衍射9-30
- 3 菲涅耳衍射9-30
 - 3.1 半波带的划分9-30
 - 3.2 波带片9-31
- 4 双缝和多缝的衍射9-31
- 5 衍射光栅9-32
 - 5.1 透射光栅9-32
 - 5.2 反射光栅9-32
 - 5.3 二维光栅9-32
 - 5.4 三维光栅9-32

第5章 偏振光及其应用

- 1 光的偏振结构9-32
 - 1.1 偏振光9-32
 - 1.2 自然光9-33
 - 1.3 部分偏振光9-33
 - 1.4 椭圆偏振光和圆偏振光9-33
- 2 产生偏振光的方法和光学元件9-33
 - 2.1 偏振片9-33
 - 2.2 反射产生偏振光9-34
 - 2.3 折射产生偏振光——玻片堆和偏振膜9-34
 - 2.4 散射产生偏振光9-34
 - 2.5 双折射产生偏振光9-34
- 3 双折射元件9-35
 - 3.1 波片(阻波片)9-35
 - 3.2 双折射光楔9-36
 - 3.3 补偿器9-36
- 4 偏振光的干涉9-36
 - 4.1 平行偏振光的干涉9-36
 - 4.2 会聚偏振光的干涉9-37
- 5 偏振光干涉的应用9-38
 - 5.1 零点补偿法9-38
 - 5.2 单 $\lambda/4$ 波片法9-38
 - 5.3 双 $\lambda/4$ 波片法9-38
- 6 人为双折射9-38

6.1 固体形变时的双折射现象9-38

6.2 电光效应9-39

7 旋光现象9-39

第6章 光源和光谱

- 1 原子光谱和分子光谱9-40
 - 1.1 原子的能级和光谱9-40
 - 1.2 分子的能级和光谱9-41
- 2 单色辐射光源9-42
- 3 连续辐射光源9-43
 - 3.1 热辐射和白炽灯9-43
 - 3.2 超高压弧光灯9-44
 - 3.3 荧光灯9-45
 - 3.4 其他9-45

第7章 光电效应和光电接收器

- 1 外光电效应和光电管9-46
- 2 内光电效应和光电池、光电二极管9-47
 - 2.1 光电导效应和光敏电阻9-47
 - 2.2 光生伏打效应和光电池9-47
 - 2.3 光电二极管和光电雪崩二极管9-48

第8章 激光

- 1 激光器的原理9-49
- 2 激光输出特性9-49
 - 2.1 激光的纵模和谱线宽度9-49
 - 2.2 激光的横模和方向性9-50
- 3 气体激光器9-51
 - 3.1 氦氖激光器9-51
 - 3.2 氩离子激光器9-52
 - 3.3 二氧化碳激光器9-52
- 4 固体激光器9-52
 - 4.1 红宝石激光器9-52
 - 4.2 钕玻璃激光器9-52
 - 4.3 掺钕YAG激光器9-52
- 5 半导体激光器和其他9-52
- 6 激光应用概况9-53

第9章 莫尔条纹技术

- 1 莫尔条纹形成原理9-53

2 莫尔条纹用于长度计量·····9-54	2.5 像平面全息图·····9-61
2.1 长光栅·····9-54	2.6 振幅全息图和位相全息图·····9-62
2.2 圆光栅·····9-55	2.7 体积全息图·····9-62
2.3 莫尔条纹的亮度变化·····9-56	3 全息干涉·····9-62
3 莫尔条纹用于消除干涉仪的系 统误差·····9-56	3.1 单次曝光全息干涉·····9-63
4 莫尔条纹用于测量周期性误差·····9-56	3.2 二次曝光全息干涉·····9-63
	3.3 时间平均值全息干涉·····9-63
	3.4 双波长全息干涉·····9-63
	3.5 全息干涉应用·····9-64
	4 全息照相应用简介·····9-64
	5 全息照相实验条件·····9-64
	5.1 全息照相的光源·····9-64
	5.2 全息照相的记录材料·····9-64
	5.3 全息照相的实验装置·····9-65
	参考文献·····9-65
第10章 光学全息照相	
1 全息照相原理·····9-57	
2 全息照相的主要类型·····9-59	
2.1 基元全息图·····9-59	
2.2 近场全息照相·····9-59	
2.3 远场全息照相·····9-60	
2.4 付立叶变换全息图·····9-61	

第1章 光的基本性质

光是一种物质，具有波动性和粒子性。光波是电磁波。同其它波动一样，光能产生干涉和衍射现象。光是以能量子——光子的形式发射的。光子同其它物质相似，有能量、质量和动量。光的二重性是物质状态对立统一的反映。研究光在传播过程中的现象，可以利用波动图象。当光与其它物质相互作用时，就必须用粒子性的概念。

1 光波

光波是一种电磁波。电场和磁场相互作用时，即产生电磁波。变化的电场产生变化的磁场，变化的磁场又产生变化的电场，并且这种变化的电场和磁场，是按波动的方式向外传播。描述光在 x 方向传播的平面波动方程为

$$E = E_0 \cos \left[2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda} \right) + \varphi_0 \right] \quad (9.1-1)$$

或
$$E = E_0 \cos(\omega t - kx + \varphi_0) \quad (9.1-2)$$

式中 E ——光波的电（或磁）场强度，也称光振动； E_0 ——振幅。采用 MKS 制， E 和 E_0 的单位为 V/m ； t ——时间，单位为 s ； φ_0 ——初周相。光波具有时间周期性和空间周期性。时间周期 T ，时间频率 $f = 1/T$ ，单位为 c/s ；空间周期为波长 λ ，单位为 \AA ($1 \text{\AA} = 10^{-10} \text{ m}$)。空间频率 $K = 1/\lambda$ ， K 也称波数。 $\omega = 2\pi f = 2\pi/T$ 为时间角频率； $k = 2\pi K = 2\pi/\lambda$ ，为空间角频率。为计算方便，将

式 (9.1-2) 用复数表示，为

$$E = E_0 e^{i(\omega t - kx + \varphi_0)} \quad (9.1-3)$$

有时可以将式中的时间因子分出来，写成

$$E = A e^{i\omega t} \quad (9.1-4)$$

式中

$$A = E_0 e^{i(-kx + \varphi_0)} \quad (9.1-5)$$

称为复振幅。光强度与振幅的平方成正比。在计算光强度 I 时，可以用复振幅 A 与其共轭复数 A^* 相乘，即

$$I \propto AA^* = E_0^2 \quad (9.1-6)$$

光强度等于单位时间内垂直通过单位面积的能量，单位是 W/m^2 。

光波是横波，它的电振动 E 、磁振动 H 和传播方向 x 三者是互相垂直的 (图 9.1-1)。

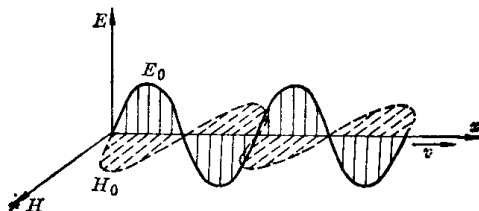


图9.1-1 电磁波

光波 (可见光及红外线、紫外线) 是电磁波谱中一个小波段 (图 9.1-2)。

光波在真空中的速度 c 约为 $3 \times 10^8 \text{ m/s}$ ，按 1973 年 10 月国际度量衡委员会 (CIPM) 建议采用 $c = 299\,792\,458 \text{ m/s}$ 。

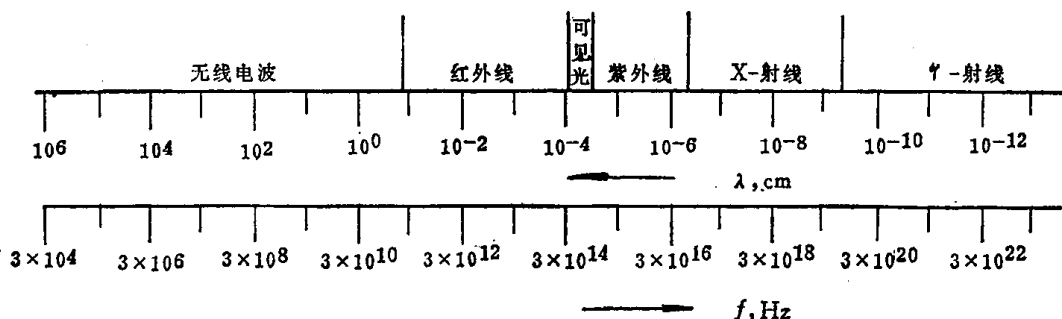


图9.1-2 电磁波谱

2 光 子

光子同其它物质微粒(如电子、质子等)相似,具有能量、质量和动量;不同的是静质量等于零。

a. 光子的能量 $E = hf$, 式中, h 为普朗克常数; f 是光波的时间频率。频率愈高, 光子的能量愈大。

b. 光子的质量 $m = hf/c^2$, 式中, c 为真空中的光速。光子的静质量等于零是它的特殊性。说明质量和能量可以相互转化, 在物质发光时, 是以光子的形式发射的, 当被其它物质吸收以后, 就不再以光子的形式存在。

c. 光子的动量 $p = mc = hf/c = h/\lambda$, 光子的动量作用于物体就产生光压。

当光与其它物质相互作用时, 如光化作用、光电效应、光的吸收和放大、光的散射等现象, 能量的交换都是以光子的形式进行。

波动性和粒子性是一切微观物质微粒都具有的共性, 这两种对立的性质可以用波函数统一起来。从波动的观点看, 波函数模的平方表示光的强度; 从粒子的观点看, 则是光子出现的几率。也就是说, 光子的统计平均分布, 表现为光的波动性质。

3 光的传播

从一个点光源发出的光波, 在各向同性、均匀介质中以相同的速度向周围传播。将位相相同的各点联接起来的面, 称为等相面或波面。一个点光源的波面是一些同心球面。对我们在某一时刻所研究的那个波面, 称为波前(图9·1-3)。

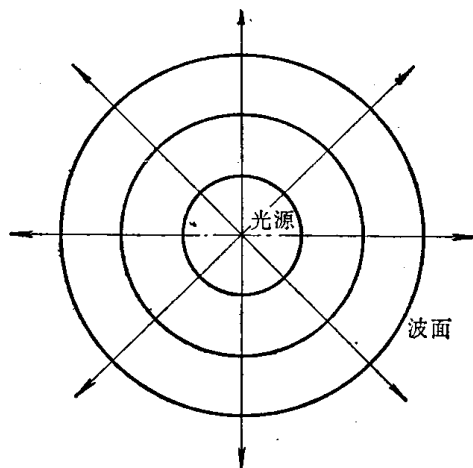


图9·1-3 光波面

根据波动过程的运动规律, 波前的传播是以子

波的形式传播的; 即波前上一点的振动要影响周围各点产生振动, 而新的波前上一点的振动是来自各点振动的叠加。图9·1-4表示的就是惠更斯的波前原理。在波前 Σ 上, 半径相同的小球面表示子波, 子波的包络面作为新的波前 Σ' , 包络面的法线方向代表光的传播方向。

在几何光学中, 把光看作传输能量的几何线叫“光线”。光线的方向表示光波传播的方向。在各向同性、均匀介质中, 光以直线传播。

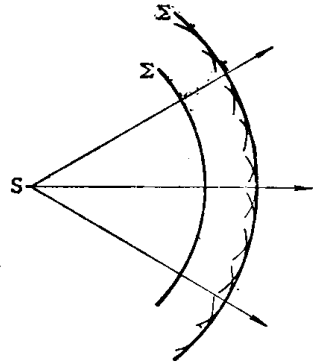


图9·1-4 惠更斯波前原理

如果光在传播中遇到障碍, 就是说挡住一部分波前, 则波前就以子波形式传播的特点显示出来(图9·1-5)。如在波前处安置一开有小孔的光屏B, 则在观察屏P上就呈现出亮暗相间的条纹, 这种现象称为光的衍射。

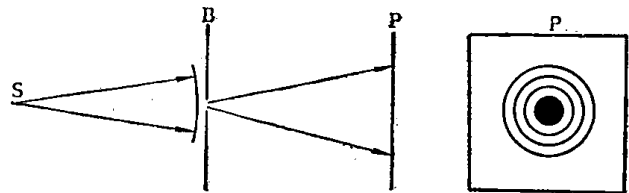


图9·1-5 光的衍射现象

光在传播过程中的另一特点是干涉现象。在一定条件下, 两光波相遇, 由于位相不同, 光振动可以相加或相减, 因而形成亮、暗相间的干涉条纹。

4 光的反射和折射

光在不同的两种介质的分界面上, 一部分光反回到原来的介质, 此为光的反射现象; 而另一部分光则进入另一介质, 其传播方向发生了改变, 此为光的折射现象。

4.1 反射定律和折射定律

4.1.1 反射定律

如图9·1-6所示, S 为两种均匀介质的分界面。平面光波 Σ_1 (垂直于图平面), 在介质1中以速度 v_1 传播, 在某一时刻与分界面 S 相遇于 O 点;

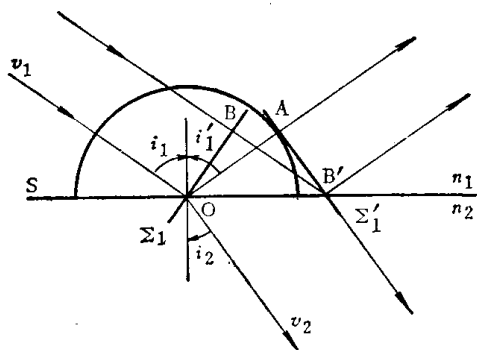


图9-1-6 光的反射

经时刻 dt 以后，波前 Σ_1 的 B 点与 S 相遇于 B' 点。以 $r_1 = v_1 dt$ 为半径，以 O 点为中心，在介质 1 中作一半球面。再通过 B' 作一反射波面 Σ_1' 与半球面相切于 A 点。根据三角形 $OB'B$ 和 $B'O A$ 全同，证明反射定律为

(1) 反射光线在入射面内（入射光与分界面法线所在的面称入射面）。

(2) 反射角 i_1' 与入射角 i_1 大小相等，位在分界面法线的两边，即

$$i_1' = -i_1 \quad (9.1-7)$$

4.1.2 折射定律

对于折射光波以 $r_2 = v_2 dt$ 为半径（图 9.1-7），以 O 点为中心，在介质 2 中作半球面，通过 B' 作折射光波面 Σ_2 与球面相切于 A 点。由三角形 $OB'B$ 和 $OB'A$ 得折射定律为

(1) 折射光线在入射面内。

(2) 入射角 i_1 的正弦与折射角 i_2 的正弦之比为—常数，即

$$\frac{\sin i_1}{\sin i_2} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{n_2}{n_1} = n_{2,1} \quad (9.1-8)$$

式中 n_1 、 n_2 ——光在介质 1、介质 2 中的绝对折射率； $n_{2,1}$ ——介质 2 对介质 1 的相对折射率。绝对折射率等于光在真空中的速度 c 与在介质中的

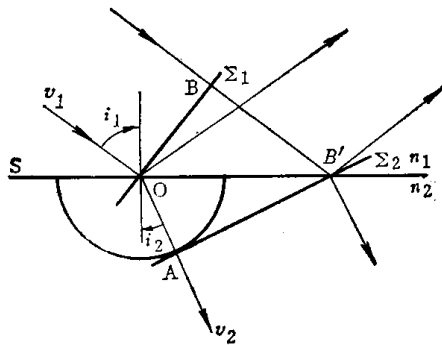


图9-1-7 光的折射

速度之比 ($n = \frac{c}{v}$)。

4.2 反射率和折射率

反射光与入射光强度之比称反射率 ρ ；折射光与入射光强度之比称透射率 τ 。当正入射 ($i_1 = 0$) 和入射角很小时，有

$$\rho = \left(\frac{1 - n}{1 + n} \right)^2 \quad (9.1-9)$$

和

$$\tau = \frac{4n}{(1+n)^2} \quad (9.1-10)$$

在一般情形下

$$\rho_p = \frac{\text{tg}^2(i_1 - i_2)}{\text{tg}^2(i_1 + i_2)} \quad (9.1-11)$$

$$\rho_s = \frac{\sin^2(i_1 - i_2)}{\sin^2(i_1 + i_2)} \quad (9.1-12)$$

$$\tau_p = \frac{\sin^2 i_1 \sin^2 i_2}{\sin^2(i_1 + i_2) \cos^2(i_1 - i_2)} \quad (9.1-13)$$

$$\tau_s = \frac{\sin^2 i_1 \sin^2 i_2}{\sin^2(i_1 + i_2)} \quad (9.1-14)$$

式中，下角标 P 表示光振动方向平行于入射面； S 表示光振动垂直于入射面。

4.3 全反射现象

反射率和透射率的大小与入射角和折射角有关，如果光由光密介质进入光疏介质，则 $i_2 > i_1$ 。当 i_1 增加到某一角度 i_c 时，折射角 $i_2 = \pi/2$ ，由式 (9.1-11) 和式 (9.1-12) 知 $|\rho_p| = |\rho_s| = 1$ ，则光全部反射，称此为全反射现象（图 9.1-8）。 i_c 称全反射角（或临界角）。

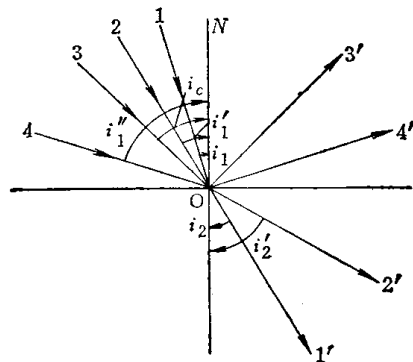


图9-1-8 全反射

5 光的吸收

光在介质中传播时，由于光与介质的能量交换

(光能转变为其它形式, 如热能、辐射能或电子的动能等), 使光的强度逐渐减弱, 称此为光的吸收现象。光的吸收是按指数规律递减的, 即

$$I = I_0 e^{-\alpha l} \quad (9.1-15)$$

式中 I_0 ——光进入介质时的强度; I ——经过厚度 l 以后的强度; α ——吸收系数, 与物质的性质和波长有关 (单位为 $1/m$), 其值等于光强度减弱为 $1/e \approx 0.37$ 时, 在介质中经过厚度的倒数 (图 9.1-9)。例如水对红光的 $\alpha = 2.4 \text{ } 1/m$, 经过 0.42 m 以后光强度减少到 0.37 倍。

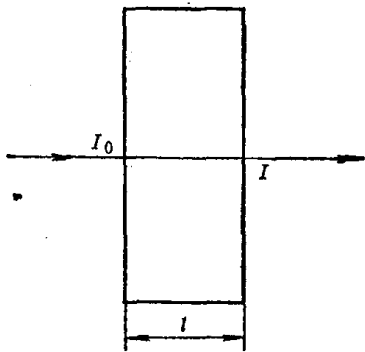


图9.1-9 光的吸收

6 光的色散

光在两种介质的界面上折射时, 折射率的大小与波长有关, 称此为光的色散现象。对于吸收系数很小的波段 (透明波段), 当波长增大时, 折射率减小, 称正常色散; 反之, 波长增大时折射率增大, 称反常色散。对于透明波段, 色散公式为

$$n = a + \frac{b}{\lambda^2} + \frac{c}{\lambda^4} + \dots \quad (9.1-16)$$

式中 λ ——光在真空中的波长;
 a 、 b 、 c 、 \dots ——常数。

7 光的散射

光经过折射率起伏的介质或无规则分布的质点时, 使光束弥散, 称此为光的散射现象。譬如, 在光束的侧面看到光束的径迹, 就是由于观察到散射光。当散射质点小于或接近于波长时, 散射规律是:

(1) 散射光的强度与波长的四次方成反比,

即

$$I \propto \frac{1}{\lambda^4} \quad (9.1-17)$$

(2) 散射光的强度与光振动方向和散射角 φ 有关 (图 9.1-10)。将光传播方向和散射光的方向

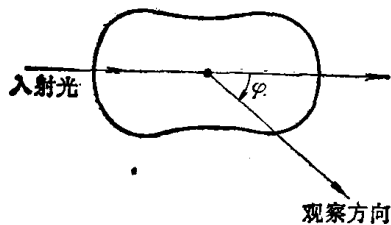


图9.1-10 光的散射

组成的平面, 称散射面。光振动垂直于散射面的散射光强度, 与散射角无关。光振动平行于散射面的散射光强度, 与散射角的余弦平方成比例, 即

$$I_p = I_{\frac{\pi}{2}} \cos^2 \varphi \quad (9.1-18)$$

式中 $I_{\frac{\pi}{2}}$ ——垂直于入射光方向散射光的强度;

I_p ——散射角为 φ 时散射光的强度。

如果入射光为自然光, 则

$$I = I_{\frac{\pi}{2}} (1 + \cos^2 \varphi) \quad (9.1-19)$$

当 $\varphi = \pi/2$ 时, 平行于散射面的光振动为零, 散射光成为全偏振光, 其它散射角是部分偏振光。

第2章 几何光学

1 理想光学系统的成像

光学系统, 通常由一系列平面、球面或曲面组成; 曲率中心在同一直线上的系统, 谓共轴系统, 它们之间的连线, 称为光轴; 曲率中心不在同一直线上的系统, 谓非共轴系统。物所在的空间, 称为

物空间; 象所在的空间, 称为象空间。

光学系统的作用为将物体成象在一定的平面上。凡能将物空间任意的点、线或与光轴垂直的平面, 与象空间唯一的点、线、面对应的系统, 称为理想光学系统。这种物和象一一对应的关系, 为共轭关系。理想光学系统的成像是完善的。

在实际光学系统的近轴区，当光束的宽度和物的尺寸均很小时，可以成一完善的象（理想象），同时，还可以找到物象位置和大小之间的比例关系。把这种关系推广应用到物空间任意平面，便可以求出实际光学系统的理想象。随着光学技术的不断发展，能够使设计出来的光学系统接近理想光学系统。理想光学系统可以作为评价实际光学系统象质好坏的标准。

1.1 符号规则

为了统一标志和使光学公式的形式在任意情况下（例如折射面为凸面或凹面，物点位在折射面的前方或后方）维持不变，规定以下符号规则：

(1) 点用大写字母表示；线段和角度在近轴区用小写字母表示，在远轴区用大写字母表示；物空间和象空间的量用同一字母表示，但象空间的量在字母的右上角加“'”号。

(2) 光学系统的折射面和反射面按照光线进行方向用序号 1、2、3、……*K* 作为注脚加以区别；每面的介质、点、线段和角度等，以该面的序号注在规定字母的右下角；两相邻面之间的距离，用前一面的序号表示；为了表示量的属性，在该量字母右下角加注有关字母，例如 *D*、*F*、*C* 谱线的折射率，用 n_D 、 n_F 、 n_C 表示。

(3) 采用 *x* 轴为光轴的数学坐标系（*x* 轴向右，*y* 轴向上为正）；物方座标为 *x*、*y*、*z*，象方座标为 *x'*、*y'*、*z'*；入瞳座标为 ξ 、 η 、 ζ ，出瞳座标为 ξ' 、 η' 、 ζ' ；方向余弦为 α 、 β 、 γ 。

(4) 光线进行方向规定为从左向右，与光学系统的实际情况一致为正向光路，反之为反向光路。

(5) 不同线段的坐标原点的选择不同，例如：截距、曲率半径、矢高以表面顶点为原点；焦距以主点为原点；焦物距以焦点为原点；顶点间距以前一面顶点为原点；象差以理想象点为原点；垂直光轴上方的线段为正，下方为负。

(6) 角度以锐角度量，孔径角由光轴转向光线，顺时针为正，反时针为负；入（折、反）射角由光线转向法线，顺时针为正，反时针为负；球心角由光轴转向法线，顺时针为正，反时针为负。

线段和角度正负号示例见图 9-2-1。

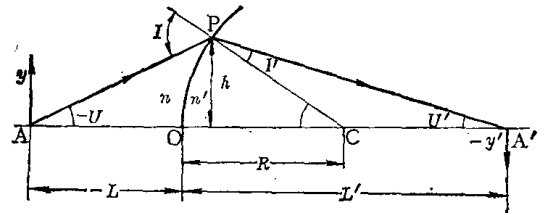


图9-2-1 线段和角度正负号示例

1.2 单个折射球面的物象位置关系式

单个折射球面的物象位置关系式，表示轴上物点位置 *l* 和它的象点 *l'*，以及折射面的半径 *R* 和物、象空间的折射率 *n*、*n'* 之间的关系，为（参见图 9-2-2）

$$\frac{n'}{l'} - \frac{n}{l} = \frac{n' - n}{R} \quad (9.2-1)$$

或

$$\frac{n(l - R)}{l} = \frac{n'(l' - R)}{l'} \quad (9.2-2)$$

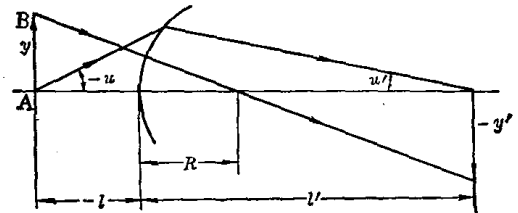


图9-2-2 单个折射球面的物象位置

1.3 基点和基面

与位于无限远且垂直光轴的物平面共轭的平面，称为象方焦平面，与位于无限远且垂直光轴的象平面共轭的平面，称为物方焦平面；它们与光轴的交点，分别称为象方焦点和物方焦点，用 *F'* 和 *F* 表示（图 9-2-3）。通过物空间与光轴平行的人射光线与其共轭的出射光线的交点 *Q'* 所作的与光轴垂

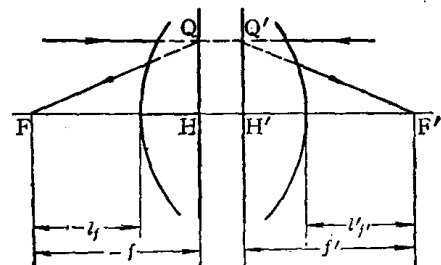


图9-2-3 基点和基面

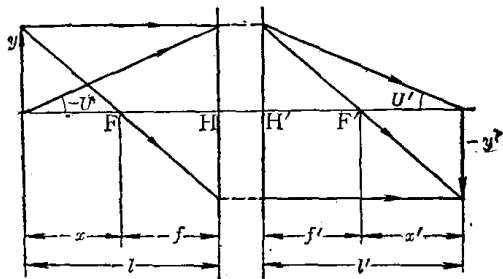
直的平面，称为象方主平面，通过象空间与光轴平行的入射光线与其共轭的出射光线的交点Q所作的与光轴垂直的平面，称为物方主平面；它们与光轴的交点，分别称为象方主点和物方主点。象方主点到象方焦点的距离，称为象方焦距，物方主点到物方焦点的距离，称为物方焦距。光学系统最后一面顶点到象方焦点的距离，称为象方焦截距，光学系统第一面顶点到物方焦点的距离，称为物方焦截距。象方焦距和物方焦距分别用 f' 和 f 表示，象方焦截距和物方焦截距分别用 l' 和 l 表示。

在图 9.2-3 中，利用光程可逆定律，如果把两条

光线的交点Q看作物点，则它们的共轭光线的交点Q'就是它的象点，则有 $QH = Q'H'$ ，故主平面上对应的点均维持共轭关系。F、F'、H、H'四个基点，以及通过它们的垂直平面（称基面），完全确定了光学系统物与象的位置和大小的相互关系。对于理想光学系统，可以抛开它的具体结构而不顾，只要知道了基点和基面，光学系统的成像规律即被确定。已知物体的位置和大小可用作图法求它的位置和大小。

1.4 理想光学系统基本公式(表9.2-1)

表9.2-1 理想光学系统基本公式



公式名称	表达形式	说 明
牛顿公式	$xx' = ff'$	以焦点为原点的物象位置关系式
高斯公式	$\frac{1}{l'} - \frac{1}{l} = \frac{1}{f'}$	以主点为原点的物象位置关系式
拉氏不变式	1 $n_1 u_1 y_1 = n_2 u_2 y_2 = \dots = \text{常数}$	表示球面折射物象的不变关系
	2 $n y \text{tg} U = n' y' \text{tg} U'$	表示理想光学系统物象的不变关系
轴向放大率	$\alpha = \frac{dl'}{dl}$	象平面沿光轴的移动量相对物平面沿光轴的移动量之比
垂轴放大率	$\beta = \frac{y'}{y} = \frac{-f}{x} = \frac{-x'}{f'} = \frac{-l'f}{lf'}$	象高和物高之比
角放大率	$\gamma = \frac{\text{tg} U'}{\text{tg} U} = \frac{l}{l'} = \frac{u'}{u}$	出射光线与光轴夹角的正切和其共轭的入射光线与光轴夹角的正切之比
三种放大率之间的关系	$\alpha = \frac{n'}{n} \beta^2$ $\alpha = \frac{n}{n'} \frac{1}{\gamma^2}$ $\beta = \frac{n}{n'} \frac{1}{\gamma}$ $\alpha \gamma = \beta$	n 和 n' 分别为物空间和象空间介质的折射率

(续)

公式名称	表达式	说明
组合系统焦距和光焦度公式	$\frac{1}{f'} = \frac{1}{f'_1} + \frac{1}{f'_2} - \frac{d}{f_1 f_2}$ $\varphi = \varphi_1 + \varphi_2 - d\varphi_1\varphi_2$ $\frac{1}{f'} = \frac{1}{f'_1} + \frac{1}{f'_2}$ $\varphi = \varphi_1 + \varphi_2$	f'_1 和 f'_2 分别为两系统的焦距, φ_1 和 φ_2 为对应的光焦度, d 为第一系统的象方主平面到第二系统物方主平面的距离, f' 和 φ 为组合系统的焦距和光焦度; 当 d 很小时, 对应薄透镜
单透镜焦距和光焦度公式	$\varphi = \frac{1}{f'}$ $= (n-1)\left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2}\right) + \frac{d(n-1)^2}{nR_1R_2}$ $\varphi = \frac{1}{f'} = (n-1)\left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2}\right)$	R_1 和 R_2 分别为单透镜两个面的半径, d 为它的厚度, n 为折射率; 不考虑 d 时, 为薄透镜公式

1.5 近轴光线光路计算(表9.2-2)

表9.2-2 近轴光线光路计算

名称	计算公式	说明
第一套计算公式	$i_1 = \frac{l-R}{R} u$ $i'_1 = \frac{n}{n'} i$ $u' = u + i_1 - i'_1$ $l' = \frac{Ri'_1}{u'} + R$	i_1 为入射角, i'_1 为折射角, l 为物距, l' 为象距, R 为折射面半径, n 和 n' 分别为物方和象方孔径角, h_1 和 h_2 分别为光线在第一面和第二面上的投射高度 当 $l = \infty$ 时, $i_1 = h/R$
第二套计算公式	$n'_1 u'_1 - n_1 u_1 = \frac{n' - n}{R} h_1$ $h_2 = h_1 - d_1 u'_1$	当 $l = \infty$ 时, $u_1 = 0$ 当 $l \neq \infty$ 时, $u_1 = h_1/l$
转面公式	$n_2 = n'_1$ $u_2 = u'_1$ $l_2 = l'_1 - d_1$	
总结公式	$f' = \frac{h_k}{u'_k}$ $l' = \frac{h_k}{u'_k}$ $\beta = \frac{nu}{n'u'}$ $y' = -f' \operatorname{tg} \omega$ $y' = y \frac{nu}{n'u'}$	物在无限远 物在有限远

2 实际光学系统的成像和象差

2.1 子午不变式和弧矢不变式

通过光阑中心E的斜光线,为主光线,它与光轴决定的平面,为子午面。自物点B发出沿主光线的子午细光束和弧矢细光束经折射面折射后,在一般情况下形成两个位置不相重合的象点T'和S',即子午象点和弧矢象点(图9.2-4),在无象散情况下这两个象点可以重合。

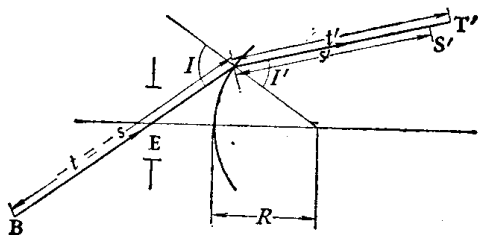


图9.2-4 子午和弧矢光路

a. 子午不变式 (物点及其子午象点的位置关系式)

$$\frac{n' \cos^2 I'}{t'} - \frac{n \cos^2 I}{t} = \frac{n' \cos I' - n \cos I}{R} \quad (9.2-3)$$

b. 弧矢不变式 (物点及其弧矢象点的位置关系式)

$$\frac{n'}{s'} - \frac{n}{s} = \frac{n' \cos I' - n \cos I}{R} \quad (9.2-4)$$

2.2 实际光学系统的光路计算

a. 计算公式 自轴外物点发出的与子午面相交的光线,称为空间光线。下列矢量法实际光学系统的光路计算公式,适用于空间光线的光路计算,其中包括子午面内光线的光路计算,可以同时计算球面和平面,还可以计算二次曲面,便于电子计算机光路计算。

图9.2-5中:

$Q(\alpha, \beta, \gamma)$ —— 折射前光线的单位矢量,括号中为入射光线的方向余弦;

$Q_1(\alpha', \beta', \gamma')$ —— 折射后光线的单位矢量,括号中为折射光线的方向余弦;

$T(x, y, z)$ —— 参考面(一般为入瞳平面)的顶点O至光线与该表面的交点的矢量,括号

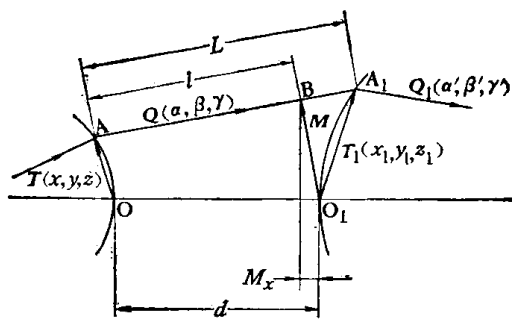


图 9.2-5

中为光线与参考面交点A的座标;

$T_1(x_1, y_1, z_1)$ —— 第1面的顶点O₁至光线与该表面的交点的矢量;括号中为光线与该表面交点A₁的座标;

M —— 自顶点O₁向入射光线所引的垂线(矢量),B为它与入射光线的交点;

M_x —— 垂线M在光轴的投影;

d —— 参考面的顶点与第1面顶点间的距离。

光路计算问题,实际上是已知入射光线的 $Q(\alpha, \beta, \gamma)$ 和 $T(x, y, z)$,确定折射后的出射光线的 $Q_1(\alpha', \beta', \gamma')$ 和 $T_1(x_1, y_1, z_1)$ 。如果光学系统有若干个面,经过类似的计算,可以找到最后的出射光线的座标。计算公式为

$$\left. \begin{aligned} l &= d\alpha - (x\alpha + y\beta + z\gamma) \\ M_x &= x + l\alpha - d \\ M^2 &= x^2 + y^2 + z^2 - l^2 - 2dx + d^2 \\ \cos I_1 &= \sqrt{\alpha^2 - \frac{M^2}{R_1^2} + \frac{2M_x}{R_1}} \\ L &= l + \frac{\frac{M^2}{R_1} - 2M_x}{\alpha + \cos I_1} \\ x_1 &= x + L\alpha - d \\ y_1 &= y + L\beta \\ z_1 &= z + L\gamma \\ \cos I_1' &= \sqrt{1 - \left(\frac{n}{n'}\right)^2 (1 - \cos^2 I_1)} \\ g &= \cos I_1' - \frac{n}{n'} \cos I_1 \\ \alpha' &= \frac{n}{n'} \alpha - g \left(\frac{x_1}{R_1} - 1 \right) \\ \beta' &= \frac{n}{n'} \beta - g \frac{y_1}{R_1} \\ \gamma' &= \frac{n}{n'} \gamma - g \frac{z_1}{R_1} \end{aligned} \right\} (9.2-5)$$

对于二次曲面, 设 e 为偏心率 ($e = 0$ 为球面; $e = 1$ 为抛物面, $e < 1$ 为椭球面, $e > 1$ 为双曲面), 对应的光路计算公式为

$$l = d\alpha - (x\alpha + y\beta + z\gamma)$$

$$M_x = x + l\alpha - d$$

$$M^2 = x^2 + y^2 + z^2 - l^2 - 2dx + d^2$$

$$Q = \sqrt{\alpha^2 + C_1^2 e^2 M_x^2 + 2C_1 M_x - C_1^2 M^2 (1 - e^2 \alpha^2)}$$

$$L = l + \frac{C_1 M^2 - C_1 e^2 M_x^2 - 2M_x}{\alpha (C_1 e^2 M_x + 1) + Q}$$

$$x_1 = x + L\alpha - d$$

$$y_1 = y + L\beta$$

$$z_1 = z + L\gamma$$

$$D = \sqrt{1 + C_1^2 e^2 (y_1^2 + z_1^2)}$$

$$\cos I_1 = \frac{Q}{D}$$

$$\cos I_1' = \sqrt{1 - \left(\frac{n}{n'}\right)^2 (1 - \cos^2 I_1)}$$

$$g = \cos I_1' - \frac{n}{n'} \cos I_1$$

$$\alpha' = \frac{n}{n'} \alpha - g \frac{x_1 - R_1}{DR_1}$$

$$\beta' = \frac{n}{n'} \beta - g \frac{y_1}{DR_1}$$

$$\gamma' = \frac{n}{n'} \gamma - g \frac{z_1}{DR_1}$$

(9-2-6)

b. 光路计算初始值的确定 在图9-2-6中, yOz 为入瞳平面, O 为坐标原点; xOy 为子午面; xOz 为赤道面; D 为空间光线在入瞳平面上的投射点, 其坐标用 $D(0, \eta, \zeta)$ 表示; B 为轴外物点, 其坐标用 $B(L-L_z, y, 0)$ 表示; BO 为入射主光线; 则

$$BD = \sqrt{(L-L_z)^2 + (\eta - y)^2 + \zeta^2}$$

$$y = (L_z - L) \operatorname{tg} \omega$$

$$\alpha = \frac{L_z - L}{BD}$$

$$\beta = \frac{\eta - y}{BD}$$

$$\gamma = \frac{\zeta}{BD}$$

(9-2-7)

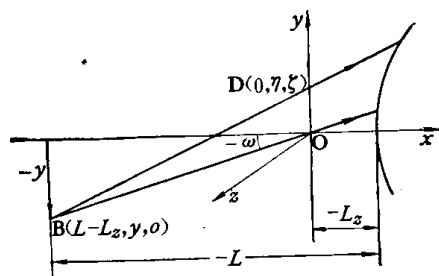


图 9-2-6

当物平面在无限远时, 计算公式为

$$\left. \begin{aligned} \alpha &= \frac{1}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \omega}} \\ \beta &= \frac{\operatorname{tg} \omega}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \omega}} \\ \gamma &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (9-2-8)$$

$$x = 0, \quad y = \eta, \quad z = \zeta \quad (9-2-9)$$

式中的 η 和 ζ , 可以按照入瞳半径 h 一定的比例选取, 一般定为 $\pm 1, \pm 0.85, \pm 0.7, \pm 0.5, \pm 0.3$.

c. 光路计算结果和象差 光路计算的总结公式为 (参见图9-2-7)

$$\frac{l'_K - x_K}{\alpha'} = \frac{y' - y_K}{\beta'} = \frac{z' - z_K}{\gamma'} \quad (9-2-10)$$

式中, y' 和 z' 为光线在象平面上的投射点的坐标。相对主光线的两个象差分量为

$$\left. \begin{aligned} \Delta y' &= \left[(l'_K - x_K) \frac{\beta'}{\alpha'} + y_K \right] - y'_z \\ \Delta z' &= (l'_K - x_K) \frac{\gamma'}{\alpha'} + z_K \end{aligned} \right\} \quad (9-2-11)$$

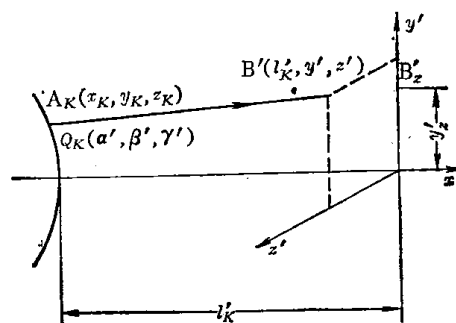


图 9-2-7

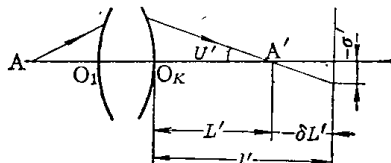
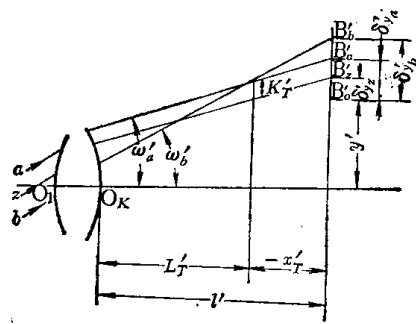
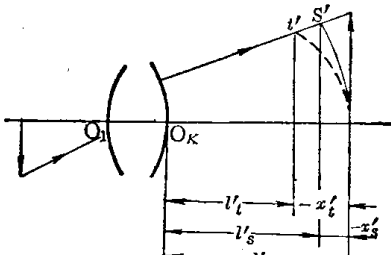
对于子午面内的光线, 由于 $z_K = z' = 0, \gamma' = 1$, 可以首先按照以下两式确定象方截距和象高:

$$l'_K = (y' - y_K) \frac{\alpha'}{\beta'} + x_K \quad (9-2-12)$$

$$y' = (l'_K - x_K) \frac{\beta'}{\alpha'} + y_K \quad (9-2-13)$$

光学系统实际象相对理想象的位置和大小的差别叫象差 (详见表9.2-3)。

表9-2-3 光学系统的象差

象差名称	表达形式	说 明
球差 垂轴球差	$\delta L' = L' - l' = -y' \frac{\alpha'}{\beta'}$ $\sigma' = \delta L' \operatorname{tg} U'$	<p>轴上点边缘光线象点和理想象点位置之差叫球差；边缘光线在象平面上的垂轴距离叫垂轴球差</p> 
子午彗差 弧矢彗差 相对弧矢彗差	$K'_T = \frac{\delta y'_a + \delta y'_b}{2} - \delta y'_z$ $K'_S = y'_z - y'_z$ $SC' = \frac{K'_S}{y'_z} = \frac{\sin U_1 u'_k}{\sin U'_k u_1} \times \frac{l' - L'_z}{L - L'_z} - 1$	<p>相对主光线对称的 a、b 子午宽光线所成的象点 B'_a 和 B'_b 的中点到主光线在象平面上的投射点 B'_z 的距离，代表子午彗差 K'_T；弧矢宽光线的象高与主光线象高之差叫弧矢彗差；弧矢彗差与理想象高之比叫相对弧矢彗差(正弦差)</p> 
细光束子午场曲 细光束弧矢场曲 宽光束子午场曲 宽光束弧矢场曲 象散	$x'_i = l'_i - l'$ $x'_s = l'_s - l'$ $x'_T = L'_T - l' = \frac{\delta y'_a - \delta y'_b}{\operatorname{tg} \omega'_a - \operatorname{tg} \omega'_b}$ $x'_s = L'_s - l'$ $x'_{is} = x'_i - x'_s$	<p>细光束的子午象点和弧矢象点在一般情况下不重合，它们相对理想象平面的距离分别叫子午场曲和弧矢场曲，它们之差叫象散</p> 
轴外球差	$\delta L'_T = x'_T - x'_i$	宽光束子午场曲与细光束子午场曲之差
绝对畸变 相对畸变	$\delta y'_z = y'_z - y'$ $\frac{\delta y'_z}{y'} \cdot 100\%$	<p>主光线象高与理想象高之差 绝对畸变与理想象高之比</p>
轴向色差 垂轴色差	$\Delta L'_{Fc} = L'_F - L'_c$ $\Delta y'_{Fc} = y'_F - y'_c$	<p>不同谱线的光线所成的象的位置差异 不同谱线的光线所成的象的大小差异</p>

1981年3月第1版

2.3 玻璃平板的初级象差公式

在光学系统中，经常遇到玻璃平板的情形，例如，望远系统中的棱镜展开以后，就相当于一块玻璃平板。设计时，总是事先计算棱镜的各种象差，然后再去设计望远物镜，以便使二者的象差互相补偿。玻璃平板的初级象差公式如表 9·2-4 所示。由于玻璃平板两个折射面的曲率半径可以认为无限大，故场曲等于零。

表9·2-4 玻璃平板的初级象差公式

名称	计算公式
球差	$\delta L' = \frac{1}{2} d \frac{n^2 - 1}{n^3} u_1^2$
彗差	$K'_s = \frac{1}{2} d \frac{n^2 - 1}{n^3} \omega_1 u_1^2$
象散	$x'_i - x'_s = d \frac{n^2 - 1}{n^3} \omega_1^2$
畸变	$\delta y'_z = \frac{1}{2} d \frac{n^2 - 1}{n^3} \omega_1^3$
轴向色差	$\Delta l'_{pc} = \frac{d}{\gamma} \frac{n - 1}{n^2}$
垂轴色差	$\Delta y'_{Fc} = \frac{d}{\gamma} \frac{n - 1}{n^2} \omega_1$

表中 n 为玻璃平板的折射率， d 为它的厚度， u_1 和 ω_1 分别为以弧度表示的孔径角和视场角， γ 为色散系数（阿贝数）

2.4 光学系统中成像光束的选择

研究实际光学系统的成像时，必须考虑此光学系统只能对物空间一定的区域成像，此外，还要考虑成像光束必须限制在一定的立体角内，这是因为实际光学系统及其光接受器（分划板、感光底片、变象管的阴极面等）都有一定的尺寸大小。如何选择成像光束问题，将直接影响光学系统各部分的外形尺寸，也影响到象面的能量分布和象质。在实际仪器中，物空间成像光束的宽度和它的位置，以及成像区域的大小，都是根据仪器的光学特性和技术要求决定的。例如，对于激光、微光和红外仪器，由于光接受器要求获得足够的光能量，光束的宽度不能太小。光束的位置是依据以下两个原则考虑的：首先考虑怎样的光束位置才能获得良好的象质，其次考虑怎样缩小光学系统的外形尺寸。有时

这两者是矛盾的，就需要按照仪器的使用要求加以协调。限制成像光束口径和位置的光阑，称为孔径光阑，它可以是一个具有圆孔的薄板，也可以是物镜框，还可以做成可调节的可变光阑。孔径光阑，通过前方（左方）光学系统所成的象称为入瞳，通过后方（右方）光学系统所成的象，称为出瞳。入瞳所在平面离开整个系统第一面的距离，称为入瞳距离，出瞳所在平面离开整个系统最后一面的距离，称为出瞳距离。

图 9·2-8 所示是一个孔径光阑 EE 位于系统中央的投影物镜。它通过其前方光学系统所成的象 E'E' 就是入瞳，而出瞳为它通过其后方光学系统所成的象 E''E''。入瞳起限制入射光束宽度和位置作用，出瞳起限制出射光束宽度和位置作用。十分明显，它们对整个系统来说是共轭的物象关系。

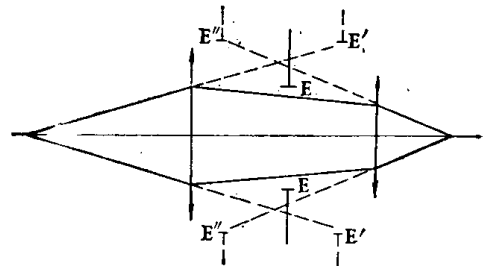


图9·2-8 有效光阑和入瞳、出瞳

2.5 光学系统的分辨率(表9.2-5)

表9·2-5 光学系统的分辨率

名称	计算公式	说明
望远物镜	$\alpha = \left(\frac{140}{D}\right)''$	用物面上刚被分辨的两点相对入瞳中心的张角度量，式中 D 为入瞳直径
显微物镜	$\sigma = \frac{0.61 \lambda}{n \sin U}$	用物面上刚被分辨的两点距离度量， $n \sin U$ 叫数值孔径，它的值愈大，分辨率愈高
照相或投影制版物镜	$N = 1476 \frac{D}{f'}$	用象面上 1 mm 内刚被分辨的线对数度量，式中， D 为入瞳直径， D/f' 为相对孔径，在象质十分完善的条件下，分辨率与相对孔径成正比

2.6 象差的容许限度(表9.2-6)

表9.2-6 象差的容许限度

名 称	计 算 公 式	说 明	名 称	计 算 公 式	说 明
焦 深	$\delta l' = \frac{\lambda}{2U'^2}$	光屏(底片或分划板)离开理想象平面所容许的最大距离, λ 为波长, U' 为孔径角	区域球差公差	$\delta L'_z \leq \frac{6\lambda}{n'U'^2}$	象平面位在四分之三区域球差处(最佳象平面位置), 满足瑞利限度
瑞利限度	$W \leq \frac{\lambda}{4}$	波象差不超过四分之一波长叫“瑞利限度”	色差公差	$\Delta l'_{fc} \leq \frac{\lambda}{2U'^2}$	两不同谱线的象点落在焦深范围以内
初级边缘球差公差	$\delta L'_m \leq \frac{4\lambda}{n'U'^2}$	象平面位在二分之一边缘球差处(最佳象平面位置), 满足瑞利限度	弧矢彗差	$K'_s \leq \frac{\lambda}{2n'U'}$	适用于望远物镜; 对于大孔径和大视场照相或投影制版物镜, 由于象质不能矫正到十分完善, 公式只具有参考价值
			相对弧矢彗差	$SC' \leq \frac{\lambda}{2n'U'y'}$	

3 光学系统的光能

3.1 光谱灵敏度、视见函数

光接受器对不同波长光线的感觉强弱不同, 是由以下两个因素决定的: 其一为光源辐射能量的大小; 另一为辐射波长对光接受器的灵敏度。光接受器(一般指感光底片、人眼、红外和微光管的阴极

面)对不同波长光线的感觉灵敏度称为光谱灵敏度。人眼所能感觉的波长只能在400~700nm范围以内, 在此范围以外的红外和紫外光是感觉不到的。在可见光谱范围, 人眼对不同波长光线的感觉灵敏度又不一样(对 $\lambda = 555\text{nm}$ 的光线感觉最灵敏)。人眼的光谱灵敏度叫“视见函数”。光度学中的物理量见表9.2-7。

表9.2-7 光度学中的物理量

名 称	计 算 公 式	单 位	说 明
光通量	$F = 634V_\lambda W_\lambda$	lm	V_λ 为视见函数, W_λ 为辐射功率
发光效率	$K = \frac{F}{W} = \frac{634 \int_0^\infty V_\lambda P_\lambda d\lambda}{\int_0^\infty P_\lambda d\lambda}$	lm/W	P_λ 为单位波长所具有的辐射功率
发光强度	均匀发光: $I = \frac{dF}{d\Omega}$ $I = \frac{F}{\Omega}$	$1\text{cd} = \frac{1\text{lm}}{1\text{单位立体角}}$	光源沿某一方向在单位立体角内发出的光通量
面发光度	均匀发光: $M = \frac{dF}{dS}$ $M = \frac{F}{S}$	$1\text{ph} = \frac{1\text{lm}}{1\text{cm}^2}$ $1\text{lx} = \frac{1\text{lm}}{1\text{m}^2} = 10^{-4}\text{ph}$	单位面积所发出的光通量

(续)

名称	计算公式	单位	说明
照度	$E = \frac{dF}{dS}$ 均匀照明: $E = \frac{F}{S}$	$1\text{ph} = \frac{1\text{lm}}{1\text{cm}^2}$ $1\text{lX} = \frac{1\text{lm}}{1\text{m}^2} = 10^{-4}\text{ph}$	被照明表面单位面积所接受的光通量
亮度	$B = \frac{l}{dS_n} = \frac{I}{dS \cos \alpha}$	$1\text{sb} = \frac{1\text{cd}}{1\text{cm}^2}$	沿法线方向单位面积的发光强度, α 为与法线的夹角
全扩散表面的亮度	$B = \frac{1}{\pi} \rho E$	sb	不发光体被发光体照射以后产生漫反射, 它在各个方向上的亮度是相同的, 这样的表面称全扩散表面

3.2 象平面的照度和照度分布

光学系统象平面的照度(中央照度)为

$$E'_0 = \pi t B \left(\frac{n'}{n} \right)^2 \sin^2 U' \quad (9.2-14)$$

当物象空间的折射率 $n = n' = 1$ (在空气中) 时, 则为

$$E'_0 = \pi t B \sin^2 U' \quad (9.2-15)$$

式中, U' 为光学系统象方孔径角, 当它不大时,

$$\sin U' \approx U' \approx \frac{D}{2f'}$$

故

$$E'_0 = \frac{1}{4} \pi t B \left(\frac{D}{f'} \right)^2 \quad (9.2-16)$$

即中央照度与相对孔径的平方成正比。

轴外象点的照度(边缘照度)为

$$E' = E'_0 \cos^4 \omega' \quad (9.2-17)$$

上式亦为象平面上的照度分布公式。不同视场的照度分布 E'/E'_0 列在表 9.2-8 中。随着视场角 ω' 的增加, 象平面的照度分布将按照 $\cos^4 \omega'$ 的四次方下降; 当 ω' 增加到 60° 时, 象平面边缘照度不到中央照度的 10%。

表 9.2-8 照度分布

ω'	E'/E'_0	ω'	E'/E'_0
0°	1.0000	40°	0.3444
10°	0.9406	50°	0.1707
20°	0.7797	60°	0.0625
30°	0.5625		

3.3 光学系统中光能的损失

光能损失的原因有两个: 其一为光束在光学零件表面上反射; 另一为光学零件对光能的吸收。反射率是分界面两边介质的折射率 n 、 n' 和入射角 i_1 的函数, 一般说来, 当 $i_1 < 30^\circ$ 时, 反射率基本维持不变。在实际计算中, 为了方便, 取玻璃与空气接触面的平均反射率为 0.04, 在透镜胶合面和棱镜全反射面上的反射损失可以忽略不计。镀铝面的平均反射率取 0.85, 镀银面的平均反射率取 0.90, 光学玻璃的透明率通常取平均值 0.99。这样, 便得到一个求光学系统透射率的近似公式

$$\tau = (0.85)^{N_1} \cdot (0.90)^{N_2} \cdot (0.96)^{N_3} \cdot (0.99)^l \quad (9.2-18)$$

式中 N_1 为镀铝面数; N_2 为镀银面数; N_3 为玻璃与空气接触面数; l 为沿光轴计算的玻璃总厚度(以 mm 为单位)。

复杂光学系统的光能损失是严重的, 主要因素是反射损失, 另外, 多次反射还可能产生寄生象。因此, 在光学工艺中, 一般采用镀透光膜的办法来减少光学零件表面的反射损失。最常用化学双层透光膜可以使反射损失降低到 0.01。这样, 式 (9.2-18) 可以改写为

$$\tau = (0.85)^{N_1} \cdot (0.90)^{N_2} \cdot (0.99)^{N_3+l} \quad (9.2-19)$$

3.4 照相物镜的光圈数

照相物镜的有效光栏一般是做成可变的, 可以根据镜圈上的刻度值来改变物镜的孔径。分度方法