

第六章 光度学基础

引言:

光有能, 入瞳出瞳就是限制能量的。
对能的讨论本不是应用光学范畴, 但要设计仪器, 又不得不了解一些起码的问题, 否则所设计的仪器可能是无用的, 因为不能传递足够的能量。我们要求光学系统传递的能量必须能被光能接收器所感知。

§ 6-1 辐射能通量, 光通量

§ 6-2 发光强度, 光照度, 光出射度和光亮度

§ 6-3 光传播过程中光学量的变化规律

§ 6-4 光学系统光能损失的计算

§ 6-5 成像光学系统像面的照度

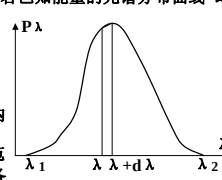
§ 6-1 辐射能通量, 光通量

一、辐射量

- 1、辐射能——以电磁辐射形式发射、传输或接收的能量称辐射能
单位: 焦耳 (J), 尔格 (erg)
- 2、辐射能通量——单位时间内通过某一面积的全部辐射能 W
由于辐射能总包含一定的光谱范围, 若已知能量的光谱分布曲线 即

$$dW = P_\lambda d\lambda$$

$$W = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} dW = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} P_\lambda d\lambda$$



任何辐射能接收器都只能接收某一光谱范围内的能量, 即对不同光谱范围有不同的灵敏度。如人眼, $\lambda = 400 \sim 760\text{nm}$ 为可见光。在这个范围内, 人眼能比较光谱波长及能量大小。但各种波长的光引起人眼感觉、灵敏度不同。

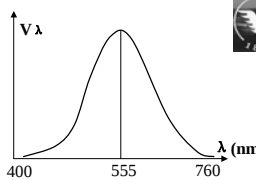
光谱光视效率

二、光谱光视效率 (视见函数)

人眼对 $\lambda = 555\text{nm}$ 的黄光最灵敏, 定 $K_\lambda = K_{555} = 1\text{unit}$

这里 K_λ 表示: 对单位波长 (1nm) 内具有 P_λ 瓦的辐射能通量, 能感受到 Φ_λ 流明的光通量, 即

$$K_\lambda = \frac{\Phi_\lambda}{P_\lambda}$$



$K_{555} = 683\text{lm/W}$ lm ——与辐射能通量相当的光度学单位 (光通量)

任意波长的 K ——表示 1W 该波长的光所相当的流明数, 为绝对灵敏度

其它 $V_\lambda = \frac{K_\lambda}{K_{555}}$ 人眼的相对灵敏度
光谱光视效率
视见函数

V_λ 表征人眼的光谱灵敏度

λ	510	610	420	700
V_λ	0.5	0.5	0.004	0.004

三、光通量与发光效率

光通量——是辐射能通量的光量度, 即若干辐射能相当于多少光。

由 $V_\lambda = \frac{K_\lambda}{K_{555}} = \frac{\Phi_\lambda}{P_\lambda K_{555}}$

得 $\Phi_\lambda = V_\lambda P_\lambda K_{555}$ 这是单位波长内的, 因此

$d\Phi_\lambda = V_\lambda P_\lambda d\lambda K_{555}$

整个光谱范围内有 $\Phi = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} P_\lambda V_\lambda d\lambda (W) = K_{555} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} P_\lambda V_\lambda d\lambda (\text{lm})$

发光效率——辐射体 (光源) 发出的总光通量与总辐射能通量之比。

$$\eta = \frac{\Phi}{W} \quad (\text{lm/W})$$

$\frac{\text{光源发出的总光通量}}{\text{总辐射能通量}}$

白炽灯 1W ~ 14lm

荧光灯 1W ~ 50lm

为什么荧光灯比白炽灯省电

§ 6-2 发光强度, 光照度, 光出射度和光亮度

一、发光强度——描述点光源的发光特性

设点光源在元立体角 $d\omega$ 内发出的光通量为 $d\Phi$, 则其发光强度为

$$I = \frac{d\Phi}{d\omega}$$

单位立体角内发出的光通量

立体角 $d\omega = \frac{dS}{R^2} \text{ (sr)}$ 因此, 整个空间 $\omega = \frac{4\pi R^2}{R^2} = 4\pi \text{ (sr)}$

当光源在各个方向上发光强度相同时, 总光通量为 $\Phi = 4\pi I_0$

$$I = \frac{d\Phi}{d\omega}$$

光源在给定方向上 1 球面度立体角内发出 0.00146W 波长为 555nm 的单色光的能通量时的发光强度

1 cd = 1 lm / 1 sr

发光强度的单位——坎德拉 (是光度学的基本单位)

K_{555} 数值的由来: 对 555nm 波长, 1lm 光通量相当于 0.00146W 的辐射能通量, 因此

$$K_{555} = \frac{1}{0.00146} = 683 \text{ (lm/W)}$$

二、光照度——光源发出的光投射到某表面, 该表面上的亮暗程度

定义为: 单位面积上得到的光通量, 即

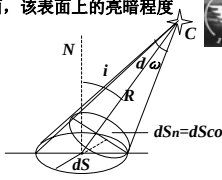
$$E = \frac{d\Phi}{dS}$$

若是点光源照明某个面积, 有

$d\Phi = I d\omega = I \frac{dS_\perp}{R^2}$

所以 $E = \frac{d\Phi}{dS} = \frac{I dS_\perp}{dS \cdot R^2} = \frac{I}{R^2} \cos i$

单位——勒克斯 (lx) 1 lx = 1 lm/m² = 1 cd • sr/m²



皓月当空: 0.2 lx
读书: 50 lx
精细工作: 100 lx

讨论: 1. I 越大则 E 越大;
2. R 越大则 E 越小;
3. 与方向有关, 当 $i=0$ 即垂直照明时 E 最大;
4. 人眼具有分辨 E 大小的能力

到自修教室占座位, 要求 E 大些, 应占何处?

三、光出射度——描述面光源的发光特性，定义为发光表面单位面积上发出的光通量，即

$$M = \frac{d\Phi}{dS}$$

单位与光照度相同

与光照度比较

透射面或反射面接受光通量，又可作为二次光源发出光通量。此时该二次光源的发光特性除与接受到的光通量有关外，还与自身的透射或反射率有关，有

$$M = \rho E \quad \rho \text{ 为透射率或反射率，与波长有关，因而物体呈现彩色}$$

对所有波长 $\rho \rightarrow 1$ 的物体 —— 白体
对所有波长 $\rho \rightarrow 0$ 的物体 —— 黑体

四、光亮度——描述有限小光源的发光特性

对有限小光源，显然

$$d\Phi \propto d\omega, \quad d\Phi \propto dS_n, \quad dS_n = dS \cos i$$

给出比例系数 L

$$d\Phi = L \cdot d\omega \cdot dS \cos i$$

L_i ——光源在与法线成 i 角方向上的光亮度

$$L_i = \frac{d\Phi}{\cos i \cdot dS \cdot d\omega}$$

另一方面，考虑到 $I = \frac{d\Phi}{d\omega}$ 可得 $L_i = \frac{I_i}{dS_n}$ I_i 方向单位面积上的发光强度

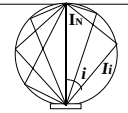
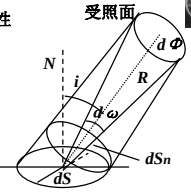
单位：尼特——面积 1 平方米的发光表面在法线方向的发光强度为 1 cd 时的亮度为 1 nt。

$$1 \text{ nt} = 1 \text{ cd}/1 \text{ m}^2$$

某些光源， L 不随方向变，此

时 I 随方向变，可推得 $I_i = I_N \cos i$

这种光源称余弦辐射体



§ 6-3 光传播过程中光学量的变化规律

一、点光源照明距离为 R 的表面时形成的照度——参见光照度

二、光亮度在同一介质中的传递——光束的光亮度

发光的面光源为 dS_1 ，接受光通量的面积为 dS_2 ，得元光管

$$d\Phi_1 = L_1 dS_1 d\omega_1 \cos i_1$$

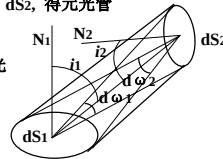
光直线传播，光路可逆，也可看成 dS_2 发光

$$d\Phi_2 = L_2 dS_2 d\omega_2 \cos i_2$$

$$\therefore d\Phi_1 = d\Phi_2 \quad \therefore L_1 = L_2$$

光束的光亮度

光在同一介质中传播，忽略散射及吸收，则在传播中的任一截面上，光通量与亮度不变。光束的亮度就是光源的亮度。



三、光束经界面反射和折射后的亮度

忽略散射、吸收损失，有 $d\Phi = d\Phi' + d\Phi''$

$$d\Phi = L dS \cos i d\omega \quad d\Phi' = d\Phi' + d\Phi''$$

$$d\Phi' = L' dS \cos i' d\omega' \quad \text{且} \quad d\omega = \sin i di d\varphi$$

$$d\Phi'' = L'' dS \cos i'' d\omega'' \quad d\omega' = \sin i' di' d\varphi'$$

$$d\varphi \text{ 按球坐标定义} \quad d\omega'' = \sin i'' di'' d\varphi''$$

反射时 $i'' = -i$ ，因此 $d\omega'' = d\omega$

$$\therefore \frac{d\Phi'}{d\Phi} = \frac{L'}{L} = \rho \quad \text{则} \quad \frac{L'}{L} = \rho$$

这里 ρ 是反射率。当入射角不大时

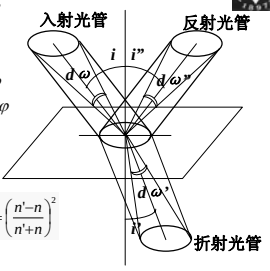
$$\rho = \left(\frac{n' - n}{n' + n} \right)^2$$

微分折射定律，有 $n' \sin i' = n \sin i$

$$n' \cos i' di' = n \cos i di$$

此二式相乘，可导出 $\frac{d\omega'}{d\omega} = \frac{\sin i' di'}{\sin i di} = \frac{n^2 \cos i}{n'^2 \cos i'}$

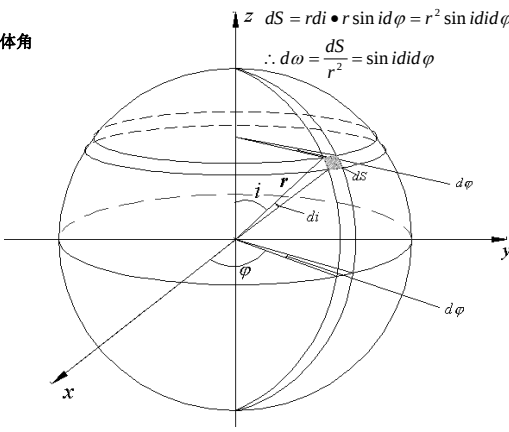
$$\text{且} \quad d\Phi' = d\Phi - d\Phi'' = d\Phi(1 - \rho)$$



反射损失

折射率因子

立体角



§ 6-4 光学系统光能损失的计算

光能损失

反射损失

光学零件与空气接触面——损失 ρ
胶合面—— n 与 n' 差不多，可略
漫反射、散射、多次反射——杂散光，应改善材料及加工质量

吸收损失

在空气中的吸收——可略
在光学零件中的吸收——损失 $(1 - \tau)$

反射面不完全反射的损失——镀膜反射面，损失 $(1 - \rho_r)$

τ 为透射率，即当光亮度为 1，经 1 cm 传播，剩下 τ 。若传播 d cm，则

$$L = L_0 \tau^d$$

$1 - \tau$ 为吸收率。一般玻璃中 $1 - \tau = 0.01$ ，空气中 $\tau = 1$

据此，按面推导，可得光学系统所通过的光能（亮度）为

$$L' = \left(\frac{n_k}{n_1} \right)^2 L \rho_r^m \prod_{i=1}^{k-1} (1 - \rho_i) \prod_{j=1}^{k-1} \tau_j^d = KL \left(\frac{n_k}{n_1} \right)^2$$

k ——系统总面数
 K ——系统总透射率
 m ——金属反射面数
 d ——近似取各光学零件的沿轴厚度

§ 6-5 成像光学系统像面的照度

一、通过光学系统的光通量

1. 进入系统的光通量 (设光源发出的光在各方向上 L 相同)
物面上 dS , 在 u 方向 $d\omega$ 立体角内

$$d\Phi = L \cos u dS d\omega$$

$$= L \cos u dS \sin u du d\phi$$

所以, dS 发出的能进入系统的总光通量

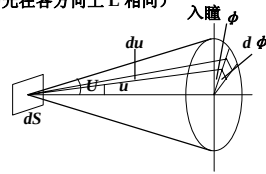
$$\Phi = \int_0^{2\pi} d\phi \int_0^U L \sin u \cos u du dS$$

$$= 2\pi L dS \int_0^U \sin u \cos u du$$

$$= \pi L dS \sin^2 U$$

如果系统的能量透过率为 K , 则由出瞳出射的光通量 $\Phi' = K\pi L dS \sin^2 U$

同理, 从像面 dS' 考虑, 可得出瞳出射的光通量 $\Phi' = \pi L' dS' \sin^2 U'$



二、轴上像点的光照度

dS' 上有 Φ' 的光通量

$$E' = \frac{\Phi'}{dS'} = K\pi L \sin^2 U \frac{dS}{dS'} = \frac{1}{\beta^2} K\pi L \sin^2 U$$

根据

$$L' = KL \left(\frac{n'}{n} \right)^2$$

$$E' = \pi K L \sin^2 U' \left(\frac{n'}{n} \right)^2$$

应相等

$$\beta = \frac{n \sin U}{n' \sin U'}$$

正弦条件

这是实际光学系统对垂轴小面积以宽光束成完善像的条件。这里从能量角度出发得到, 表示无光能分散

讨论:

$$\textcircled{1} E' \propto \sin^2 U$$

光学系统孔径越大, 像面照度越大

$$\textcircled{2} E' \propto \frac{1}{\beta^2}$$

系统放大倍率越小, 像面照度越大 (若 β 大, 为了保证像面足够的像面照度, 更要求照明好, U 要大)

高倍显微镜孔径宜大还是宜小

三、轴外像点的光照度

当物面亮度均匀时

$$E_m = \left(\frac{n'}{n} \right)^2 K\pi L \sin^2 U_m'$$

$$\text{由于 } \sin U_m' \approx \frac{P'P_1' \cos W'}{P'M'}$$

$$\sin U' \approx \frac{P'P_1'}{P'A'}$$

$$\text{所以 } \frac{\sin U_m'}{\sin U'} \approx \frac{\cos W' \cdot P'A'}{P'M'} = \cos^2 W'$$

$$\text{得 } E_M' = E' \cos^4 W'$$

为什么短焦镜头拍的照片常可看出边缘较暗?



本章小结

概念: 辐射能通量, 光通量, 视见函数, 发光效率

发光强度, 光照度, 光出射度, 光亮度

(单位、关系)

计算: 光能损失、像面照度

有关问题

