

光度学

在可见光波段内，考虑到人眼的主观因素后的相应计量学科称为光度学，其是 1760 年由朗伯建立的，且定义了发光强度、光通量、照度、亮度等主要光学光度学参量，并用数学阐明了它们之间的关系和光度学几个重要定律，如照度的叠加性定律、距离平方比定律、照度的余弦定律等，这些定律一直沿用至今，实践已证明是正确的。

光度学除了要定义一些物理量并确定相应的测量单位外，还要研究测量仪器的设计、制造和测量方法。对各种光源进行光度的特性测量广泛应用于光学工业、照明工业、遥感遥测、色度学和大气光学等领域。对各种光敏和热敏探测器也需要运用光度的测量技术来确定其灵敏度及响应特性。

光度学与光相关的常用量有 4 个：发光强度、光通量、照度、亮度。这 4 个量尽管是相互关联的，但是有不同定义，不能相混。就像压力、重力、压强、质量是不同的物理量一样。

1.1 光度学中基本角度概念

平面角----平面角的单位叫弧度(rad)，1 弧度是半径为 1 米的圆上，1 米长的圆弧对圆心所包含的张角(见图 2-7)。

$$a = \frac{l}{r} \quad \text{式 2-2}$$

式中：α --- 弧度，rad；

l --- 弧长，m；

r --- 半径，m；

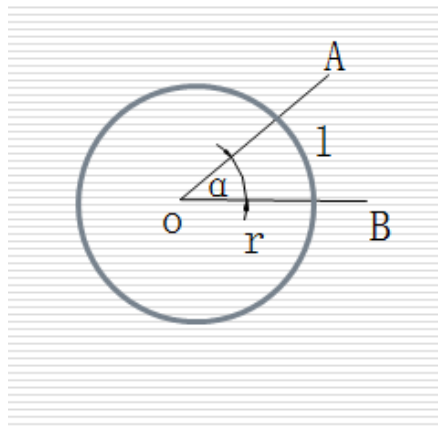


图 2-7 平面角示意图

立体角----立体角的单位叫球面度(sr)，即 1 球面度是半径为 1 米的球面上，1 平方米的球表面积对球心所张的立体角。

$$\Omega = \frac{A}{r^2} \quad \text{式 2-3}$$

式中： Ω ---立体角，sr；
 A ---球表面积， m^2 ；
 r ---球半径，m；

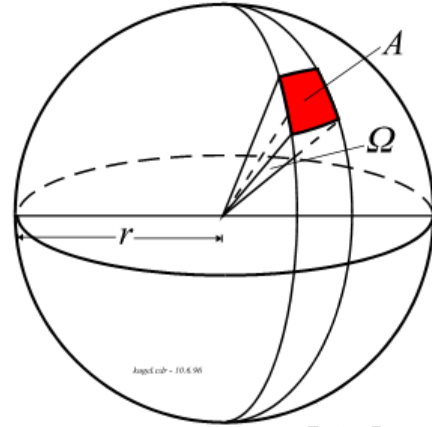


图 2-8 立体角示意图

整个球面的表面积为 $4\pi r^2$ ，因此整个空间的立体角为

$$\Omega = \frac{4\pi r^2}{r^2} = 4\pi$$

即整个空间的立体角为 4π 球面度

1.2 光度学基本概念

辐射能量(Q)----简称辐能，描述以辐射的形式发射、传输或接收的能量，单位焦耳(J)。当描述辐射能量在一段时间内积累时，用辐能来表示，例如：地球吸收太阳的辐射能，又向宇宙空间发射辐射能，使地球在宇宙中具有一定的平均温度，则用辐能来描述地球辐射能量的吸收辐射平衡情况。

辐射通量(Φ , P)----以辐射的形式发射、传输或接收的功率，用以描述辐能的时间特性。实际应用中，对于连续辐射体或接收体，以单位时间内的辐射能，即辐射通量表示。因此，辐射能量是一个十分重要的辐射度量，辐射通量的单位是瓦(W)。

辐射通量换算辐射能量单位： $1W=1J/S$ 。

辐射强度----定义为在给定传输方向上的单位立体角内光源发出的辐射通量(见图 2-9)，即



$$I = \frac{d\Phi}{d\Omega} \quad \text{式 2-4}$$

图 2-9 辐射光强示意图

式中: I --- 辐射强度, w/sr ;

$d\Phi$ --- 给定立体角元内的辐射通量, w ;

$d\Omega$ --- 立体角, sr ;

辐射出(射)度---定义为离开光源表面单位面元的辐射通量(见图 2-10 a),

即

$$M = \frac{d\Phi}{dA} \quad \text{式 2-5}$$

式中: M --- 辐射出(射)度, w/m^2 ;

$d\Phi$ --- 给定单位面元内出射的辐射通量, w ;

dA --- 单位面元, m^2 ;

面元所对应的立体角是辐

射的整个半球空间。例如, 太阳表面的辐射出射度指太阳表面单位表面积向外部空间发射的辐射通量。



图 2-10 辐射出射度(a)和辐射照度示意图(b)

辐射照度---定义为投射到包含该点的单位面元上的辐射通量 $d\Phi$ 除以该面元面积 dA (见图 2-10 b)

$$E = \frac{d\Phi}{dA} \quad \text{式 2-6}$$

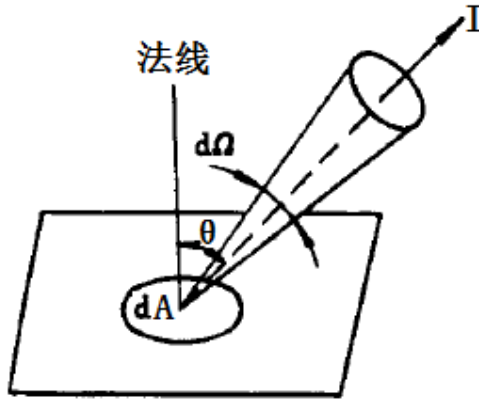
式中: E --- 辐射照度, w/m^2 ;

$d\Phi$ --- 给定单位面元内射入的辐射通量, w ;

dA --- 单位面元, m^2 ;

辐射出射度和辐照度具有相同的定义方程和单位, 但却分别用来描述微面元发射和接收辐射通量的特性。如果一个表面元能反射入射到其表面的全部辐射通量, 那么该面元可看作是一个辐射源表面, 即其辐射出射度在数值上等于照射辐照度。

辐射亮度----定义为光源在给定方向上的亮度 L ，是光源在该方向上的辐射强度除以面元在垂直于给定方向上的正投影面积。



$$L = \frac{I}{dA \cdot \cos \theta} \quad \text{式 2-7}$$

式中： L ---辐射亮度， $W/(m^2 \cdot sr)$ ；
 I ---给定立体角元内辐射强度
 dA ---单位面元， m^2 ；
 $\cos \theta$ ---法线与辐射强度间的夹角，度；

图 2-11 辐射亮度示意图

光通量----定义为能够被人眼视觉系统所感受的那部分有效当量，它等于单位时间内可见波段的辐射通量和可见波段的相对光谱视见函数 $V(\lambda)$ 的乘积。

$$\Phi = Km \int_{380}^{780} P_{\lambda} \cdot V_{\lambda} \cdot \Delta \lambda \quad \text{式 2-8}$$

式中： Φ ---光通量， lm ；

Km ---人眼对于光的感知能力最大值 $683lm/w$ ，常数；

P_{λ} ---光谱分布的辐射通量， W ；

V_{λ} ---明视觉视见函数，均为常数；

流明和发光强度之间换算： $1lm$ 等于 $1cd$ 的发光强度均匀分布在一球面度(sr)立体角内所对应的光通量。

常见发光的大致效率（流明/瓦）

白炽灯：15

白色 LED：80-100

日光灯：80

太阳：94

钠灯：80-120

发光强度----定义为在给定传输方向上的单位立体角内光源发出的光通量，

即

$$I = \frac{d\Phi}{d\Omega} \quad \text{式 2-9}$$

式中：I---发光强度，cd；

$d\Phi$ ---给定单位立体角内的光通量，lm；

$d\Omega$ ---立体角，sr；

常见光源发光强度（cd）：

太阳： 2.838×10^{27}

高亮手电：100000

照度----定义为投射到包含该点的面元上的光通量 $d\Phi$ 除以该面元面积 dA 。

即

$$E = \frac{d\Phi}{dA} \quad \text{式 2-10}$$

式中：E---照度，lx；

$d\Phi$ ---给定单位面元内的光通量，lm；

dA ---单位面元， m^2 ；

常见照度（lx）：

阳光直射（正午）下：110000

阴天室外：1000

商场内：500

阴天有窗室内：100

普通房间灯光下：100

满月照射下：0.2

亮度----定义为光源在给定方向上的亮度 L ，是光源在该方向上的发光强度除以面元在垂直于给定方向上的正投影面积。

$$L = \frac{I}{dA \cdot \cos q} \quad \text{式 2-11}$$

式中：L---亮度， cd/m^2 ；

I---给定立体角元内发光强度

dA ---单位面元, m^2 ;

$\cos \theta$ ---法线与发光强度间的夹角, 度;

对于漫反射表面(有前提条件), 其表面亮度 L 与表面照度 E 的关系, 即

$$L = \frac{rE}{\rho} \quad \text{式 2-12}$$

式中: L ---亮度, cd/m^2 ;

ρ ---漫反射表面反射率, 无单位通常以百分数表示;

E ---漫反射表面照度, lx ;

对于均匀漫透射表面(有前提条件), 其表面亮度 L 与表面照度的关系, 即

$$L = \frac{tE}{\rho} \quad \text{式 2-13}$$

式中: L ---亮度, cd/m^2 ; (以前称尼特 nit)

τ ---漫反射表面透射率, 无单位通常以百分数表示;

E ---漫透射表面照度, lx ;

常见发光体的亮度(cd/m^2)

红色激光指示器: 20000000000

太阳表面: 2000000000

白炽灯灯丝: 10000000

阳光下的白纸: 30000

人眼能习惯的亮度: 3000

满月表面: 2500

人眼能比较好的分辨出颜色的亮度: 1

满月下的白纸: 0.07

无月夜空: 0.0001

光谱辐照度----定义为入射在一个面元上的一定波长间隔内发出的辐射通量 $d\Phi_\lambda$ 与该面元的面积 dA 和波长间隔 $d\lambda$ 之商

$$E_\lambda = \frac{d\Phi_\lambda}{dA \cdot d\lambda} \quad \text{式 2-14}$$

式中: E_λ ---光谱辐射照度, $w/(m^2 \cdot nm)$;

$d\Phi_\lambda$ ---给定单位面元内的辐射通量, w ;

dA ---单位面元, m^2 ;

$d\lambda$ ---波长间隔, 通常取 $1nm$ 或 $5nm$;

在波长间隔取值不同时光谱辐射照度单位也有相应变化, 相应数值也同时变化:

假设某一波段波长取 $1nm$ 间隔对应的单位为 $w/(m^2 \cdot nm)$

假设某一波段波长取 $5nm$ 间隔对应的单位为 $w/(m^2 \cdot 5nm)$

光谱辐射亮度----定义为通过给定点并沿给定方向立体角传播的辐射功率 $d\Phi(\lambda)$ 与波长间隔 $d\lambda$ 、通过给定点并垂直于给定方向的光束截面积($\cos\theta dA$) 以及立体角 $d\Omega$ 之商。

$$L_l = \frac{d\Phi_l}{dA \cdot \cos q \cdot d\Omega \cdot d_l} \quad \text{式 2-15}$$

式中: L_λ ---光谱辐射亮度, $w/(m^2 \cdot nm \cdot sr)$;

$d\Phi_\lambda$ ---给定立体角内的辐射通量, w ;

dA ---单位面元, m^2 ;

$\cos\theta$ ---法线与发光强度间的夹角, 度;

$d\Omega$ ---给定立体角, sr ;

d_λ ---波长间隔, 通常取 $1nm$ 或 $5nm$;

1.3 光度学定律

1.3.1 朗伯定律----设 dA 为一发光面或漫射光表面, 由量度的定义可知, 在与法线成 θ 角方向的亮度为:

$$L_q = \frac{I_q}{d_A \cdot \cos q} \quad \text{式 2-16}$$

式中: I_θ 为 θ 方向上的发光强度, 如图 2-12 所示;

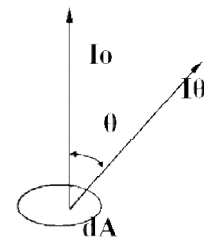


图 2-12

同理, 在法线方向上的亮度为: $L_o = \frac{I_o}{d_A}$ 如果发光面或漫射表面的亮度不随方向

改变, 则在法线方向和成 θ 角方向的亮度相等, 因此有:

$$L_q = L_o = \frac{I_q}{d_A \cdot \cos q} = \frac{I_o}{d_A}$$

$$I_q = I_o \cdot \cos q \quad \text{式 2-17}$$

上式为朗伯定律（或发光强度的余弦定律）的数学表达式。遵从朗伯定律的光源称为朗伯光源，他的亮度是不随观察的方向改变而变化的。严格地讲，只有绝对黑体才是朗伯光源。被均匀照明的烟熏的氧化镁表面、毛玻璃或乳白玻璃表面，都可以近似地看作遵从朗伯定律的光源。

1.3.2 照度的叠加定律----照度具有叠加特性，当多个光源叠加时照度增加，这也是组合型灯具构造的基础。由图 2-13，已知两束光分别为 E1 和 E2 同时照射到同一平面上得到照度值 E3。如果光束法线方向射入按实际的照度值相加即可。

由于图 2-13 涉及到 α_1 和 α_2 入射角度。E1 经 α_1 射入后照射到 E3 平面的照度值为 $E_1 \cos \alpha_1$ ，E2 经 α_2 射入后照射到 E3 平面的照度值为 $E_2 \cos \alpha_2$ 。故在 E3 平面照度叠加后

$$E_3 = E_1 \cdot \cos \alpha_1 + E_2 \cdot \cos \alpha_2$$

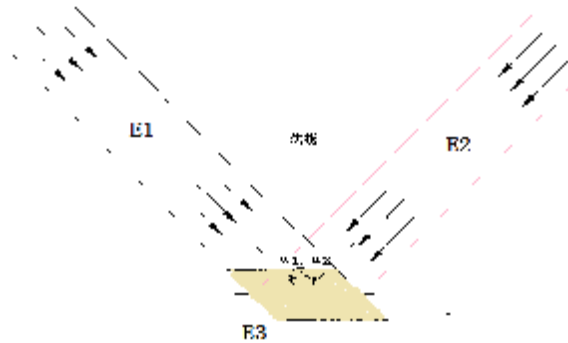


图 2-13 照度叠加定律示意图

1.3.3 照度距离平方反比定律----光的强弱由两个因素决定：

(1)光源的发光强度；

(2)被照射对象和光源之间的距离。人工光条件下照度与光源距离的平方成反比即

$$E = \frac{I}{d^2} \quad \text{式 2-18}$$

式中： E---照度, lx;

I---发光强度, cd;

d---探测器与光源之间的距离，m；

照度距离平方反比定律应用比较广泛：如空间光强分布曲线（配光）计算、照度计计量检定、光强灯计量检定等等。

1.3.4 光通量-光强-照度三者之间相互关系转换图 2-14：

根据下图关系转换图内公式即可获得需要的光度参数。

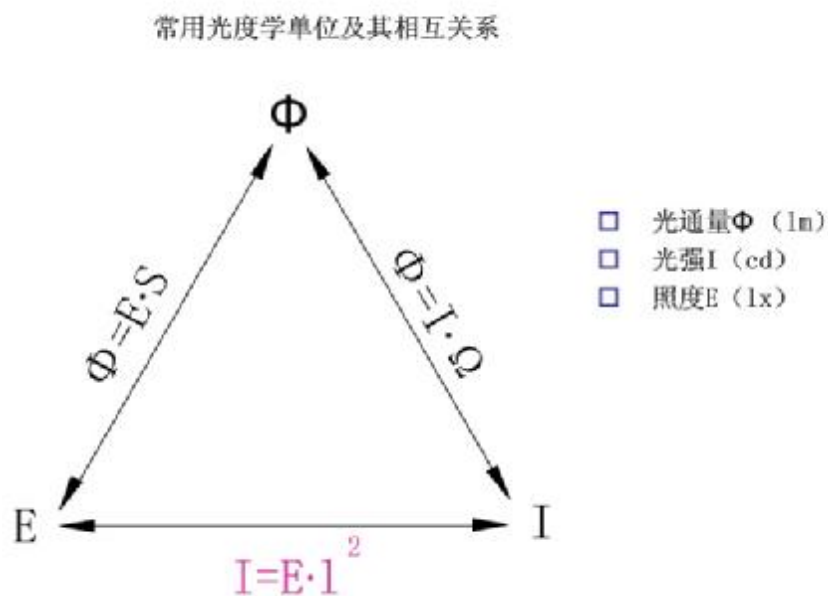


图 2-14 光通量-光强-照度相互关系转换图