

## 第二篇 光电测控系统基本模块

光电测控系统的基本功能模块如第一篇中图 1.1 所示，它通常可以分解为由光信息产生模块、光信息获取和转换模块、光电信息处理模块和系统执行模块几大功能模块构成的闭环系统。本篇将分别讨论这几个模块的组件及设计。

### 第 3 章 光信息的产生模块

#### 3.1 光电测控系统中的光源及辐射源

##### 3.1.1 光源的几个基本概念

光源是光信息产生模块的核心，是指产生红外、紫外和可见光波段光辐射的物体。

我们现在应用的光源，总的来说，可以分为自然光源和人造光源，自然光源主要是指天然存在的如太阳辐射、地面热辐射等。因为自然光源的稳定性不易控制，因此较少用于测试测量中。

人造光源按其发光机理可分为：热辐射源，受激辐射源，电致辐射源，光致辐射源，化学和生物发光，场致发光，以及阴极射线发光等。

作为光电测控系统中一种必不可少的器件，光源的应用主要集中在仪器的传感系统和读数系统两部分，为了在设计和应用光电测控系统时能选择合适的光源，有必要对有关光源的一些基本物理量和定律做一个简单的回顾。

##### 1. 光源的几个基本参数

我们知道可见光主要由辐射量和光学量这两种量值系统来度量，以下将对光电测控系统中常常涉及到的几个辐射量和光度学量做一些介绍。

###### (1) 光源相关基本概念

1) 黑体：是人们假设的一个理想的模型，不反射光、在相同的温度下都发出同样形式的热辐射电磁波谱，能吸收任何波长的辐射。通常称为“绝对黑体”或“黑体”，是一种理想化的模型，自然界中不存在。

2) 光谱功率分布：简单说就是指光源中不同颜色光线辐射出的功率大小。光源的光谱功率分布通常分为四种情况，如图 3.1 所示，其中，图(a)为线状光谱，如低压汞灯的光谱，图(b)为带状光谱，如高压汞灯和高压钠灯的光谱，图(c)为连续光谱，所有热辐射光源的光谱都是这种类型的，如白炽灯、卤素灯光谱，图(d)为复合光谱，由线状、带状光谱与连续谱组合而成，如荧光灯光谱。

3) 色温：若某光源所发射出光的颜色与标准黑体在某一温度下辐射的颜色相同，则标准黑体的温度就称为该光源的色温。色温表现了光源辐射光谱特征。

4) 发光效率：在一定波长范围内，光源发出的光通量  $\phi$  与所消耗的电功率  $p$  之比，称为该光

源在这一波段的发光效率  $\eta$ ，即光源每消耗一瓦功率所发射出的特定波长的流明数。表示为

$$\eta = \frac{\phi}{P} = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \phi d\lambda}{P} \quad (3.1)$$

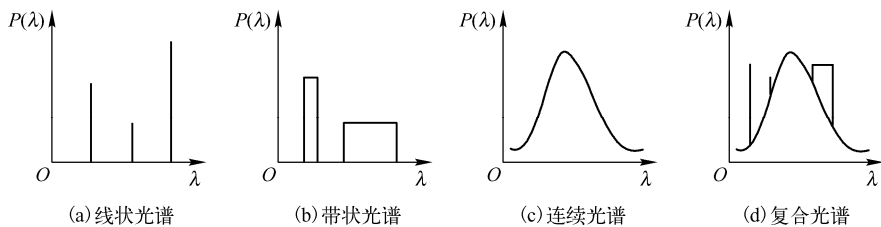


图 3.1 几种典型的光源功率谱分布

应尽量选用  $\eta$  值高的光源。

## (2) 照明的基本概念

1) 辐射通量：单位时间内某辐射体发射出的总能量称为辐射通量，单位为瓦特 (W)。

2) 光通量：某辐射体辐射通量在可见光波段的部分称为光通量，这是一个表示可见光对人眼视觉刺激程度的量，单位为流明 (lm)。光通量  $\phi$  与辐射通量  $\phi_e$  之间的关系为：

$$\phi = \int_0^{\infty} C V_{(\lambda)} \phi_{e\lambda} d\lambda \quad (3.2)$$

其中  $C$  为常数，在所有量都取国际单位的情况下， $C=683(\text{cd}\cdot\text{sr})/\text{W}$ ， $V_{(\lambda)}$  为视见函数。

3) 发光强度：发光强度是表征光源在特定方向上的发光强弱的量。假如点光源在某一立体角  $d\Omega$  内发出的光通量为  $d\phi$ ，则光源在这一方向上的发光强度为  $I = d\phi / d\Omega$ ，即点光源在单位立体角内发出的光通量，单位为坎德拉 (cd)。

4) 光出射度：单位面积上光源发出的光通量称为光出射度，假定微小面元  $dA$  发出的光通量为  $d\phi$ ，则光出射度可表示为  $M = \frac{d\phi}{dA}$ ，单位为流明/平方米 ( $\text{lm}/\text{m}^2$ )。

5) 光亮度：发光面上单位投影面积在单位立体角内所发出的光通量，表示了发光面不同位置不同方向的发光特性。假定微小面元  $dA$  在  $AO$  方向的发光强度为  $I$ ，则光亮度用公式表示为

$$L = \frac{I}{dS \cdot \cos \alpha} \quad (3.3)$$

$\alpha$  为  $dA$  法线与  $AO$  之间的夹角， $L$  单位为坎德拉每平方米 ( $\text{cd}/\text{m}^2$ )。

## 2. 有关光源的几个基本定律

### (1) 基尔霍夫定律 (Kirchhoff laws)

我们知道，任意温度高于绝对温度的物体总是一刻不停地在发射与自身温度  $T$  相对应的电磁辐射，同时也吸收外界的电磁辐射。在对黑体和黑体模型进行了大量研究的基础上，基尔霍夫提出，在一定温度下，对任何物体而言，其辐射发射量  $M(\lambda, T)$  都与本身性质无关，而是一个与物体的吸收率  $\alpha(\lambda, T)$  成正比的普适函数，这就是基尔霍夫定律，用数学表达式可以表示为：

$$\frac{M_1(\lambda, T)}{\alpha(\lambda, T)} = \frac{M_2(\lambda, T)}{\alpha(\lambda, T)} = \dots = f(\lambda, T) \quad (3.4)$$

其中  $f(\lambda, T)$  是一个只与波长和温度有关的函数，并且恒等于同温度下黑体的辐射本领。式 (3.4)

说明在热平衡状态下，对任意波长而言，物体 A 的辐射功率与吸收功率相等，并可推出

$$\frac{M_A(\lambda, T)}{\alpha_A(\lambda, T)} = H(\lambda, T) \quad (3.5)$$

其中  $H(\lambda, T)$  表示物体 A 所接受的表面照度，此式是普适的。由以上式子可得出

$H(\lambda, T) = f(\lambda, T)$ ，它表明任意物体的单色辐出度与单色吸收率的比例系数与个别物体无关，而是等于真空中的光谱辐照度。

### (2) 斯忒藩-玻耳兹曼定律 (Stefan-Boltzmann law)

斯忒藩-玻耳兹曼定律是一个研究黑体辐射的实验定律，描述了黑体辐射的全波长辐射量  $M(T)$  与温度之间的关系。

由基尔霍夫定律可以看出， $M(\lambda, T)$  是温度的函数，在全波长范围内对  $\lambda$  积分，必然得到关于温度的函数，并且 1879 年，斯忒藩 (J. Stefan, 1835~1893 年) 从实验观察到黑体的辐出度与绝对温度  $T$  的四次方成正比，用公式可描述为：

$$M(T) = \int_0^{\infty} M(\lambda, T) d\lambda = \sigma T^4 \quad (3.6)$$

其中  $M(T)$  是全波长范围内黑体的辐射出射度， $\sigma$  是斯忒藩-玻耳兹曼常数， $\sigma = 5.67032 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ ， $T$  是黑体的热力学温度。从式中和图 3.2 可以看出，黑体的全波长辐出度 (即为一定温度  $T$  时的曲线下方面积) 随温度的升高而显著增加，由此可以看出，很小的温度变化就可引起全波辐射出射度的很大变化，此定律称为斯忒藩-玻耳兹曼定律，可用此定律来求温度  $T$ 。由物体辐射出射度的变化还可求出其温度的变化。

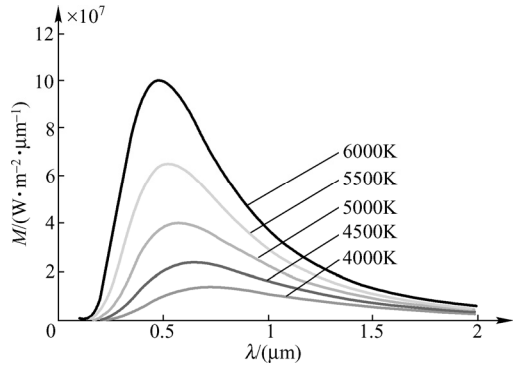


图 3.2 不同温度下黑体辐射的功率谱

### (3) 维恩位移定律 (Wien displacement law)

从上面的曲线中可以看出，随温度的升高，单色辐射出射度的峰值波长向短波方向移动，这就是维恩位移定律的内容，该定律也是一个实验定律，用公式表示为：

$$\lambda_m T = b \quad (3.7)$$

$b$  称作位移常数， $\lambda_m$  是黑体辐射辐射量的峰值波长， $T$  是热力学温度。维恩位移定律的意义还在于，如果知道了黑体的热力学温度，就可求出黑体最大出射辐射度对应的峰值波长，反之，如果测得了黑体的峰值辐射波长，则可以推出黑体的表面热力学温度。

### (4) 普朗克定律 (Planck law)

黑体辐射规律是原子能级上的规律，传统的经典物理学无法对其做出准确的解释。1900 年，普朗克提出一个基于量子物理的假说，即黑体辐射式带电的质点 (如分子，原子等) 发生振动的结果，这些质点的振动激发出电磁波，并和周围的电磁场交换能量，但其交换和辐射的能量都是量子化的，只能是一个基本量的整数倍，并且是不连续的，其能量为

$$\varepsilon = h\nu \quad (3.8)$$

$h$  是普朗克常数， $\nu$  是辐射频率。根据这个量子假说，普朗克提出了著名的黑体辐射光谱分布方程式，也就是普朗克公式：

$$M_B(\lambda, T) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 (e^{hc/\lambda kT} - 1)} \quad (3.9)$$

令  $c_1 = 2\pi hc^2$ ， $c_2 = hc/k$ ，公式可写为

$$M_B(\lambda, T) = \frac{c_1}{\lambda^5 (e^{c_2/\lambda T} - 1)} \quad (3.10)$$

其中,  $\lambda$  是辐射波长;  $T$  是热力学温度;  $h = (6.6256 \pm 0.0005) \times 10^{-34} \text{ W} \cdot \text{m}^2$ , 是普朗克常数;  $c = 2.99793 \times 10^8 \text{ m/s}$ , 是光在真空中传播速度;  $c_1 = (3.741832 \pm 0.000020) \times 10^{-12} \text{ W} \cdot \text{cm}^2$ , 称作第一辐射常数;  $c_2 = (1.438786 \pm 0.000045) \times 10^4 \mu\text{m} \cdot \text{K}$ , 称作第二辐射常数。根据普朗克公式可得出不同温度条件下黑体的单色辐射出射度的变化曲线, 如图 3.2 所示, 由图可见:

1) 在某一温度下, 黑体的光谱辐射出射度随波长连续变化, 具有单一峰值, 且对应不同温度的曲线不相交, 由此可见黑体的单色辐射出射度和辐射出射度由温度唯一确定。

2) 随温度的升高, 单色辐射出射度和辐射出射度增大。

3) 峰值波长随温度升高向短波方向移动(维恩位移定律), 每一条曲线下的面积对应某一温度下黑体的辐射出射度(斯忒藩-玻耳兹曼定律)。

### 3.1.2 测控系统中的光源选择

为了满足各种具体的应用, 人们设计了各种类型的光源, 在具体的光电检测系统中, 按实际的工作需要选择合适的光源, 是顺利设计和应用光电测控系统的关键因素之一。选择光源时要考虑的因素很多, 主要的有以下几个方面。

#### 1. 对光源光谱特性的要求

对光源光谱特性的要求主要基于三方面。

##### (1) 人眼的视见函数的影响

在需要人眼直接观察的光学仪器中, 必须考虑观察目标的光亮度问题, 人眼视觉的强弱, 不仅取决于目标的辐射强度或辐照度等因素, 同时还和照明光源的波长有关, 人眼只对波长在 400~760nm 范围的电磁辐射敏感, 同时即使在可见光范围内, 人眼对不同波长的光敏感度也不同。

##### (2) 满足测试系统的要求

不同的测试系统或检测任务, 要求的光谱范围也不同, 如可见光、红外光、白光或单色光, 有时要求连续的光谱或特定的光谱段等。如在一些干涉测量仪器中, 必须要求光源是相干光源。总之, 选择光源时必须满足系统对光源光谱特性的要求。

##### (3) 满足探测器的要求

光源必须和系统中信号探测器的光谱特性相匹配, 为增大光电检测系统的信噪比, 定义光源和

探测器光谱匹配系数  $\alpha$  的概念, 借此描述光谱特性间的重合度。 
$$\alpha = \frac{\int_0^{\infty} W_{\lambda} \cdot S_{\lambda} d\lambda}{\int_0^{\infty} W_{\lambda} d\lambda}$$
 ,  $S_{\lambda}$  为光电探测

器在  $\lambda$  波长处的相对灵敏度,  $W_{\lambda}$  为光源在  $\lambda$  波长处的相对光辐射通量。可见,  $\alpha$  表示光源与探测器产生的光电信号与光源总通量的比值。设计或使用仪器时应尽可能使  $\alpha$  的值大些。

#### 2. 对光源光度特性的要求

这里所说光源光度特性主要指以下特性。

##### (1) 光源的发光强度

光源的发光强度必须合适, 强度太小, 无法满足探测器性能或人眼的视见要求, 可能会导致无法正常工作, 强度太大, 可能导致仪器的非线性误差甚至损坏仪器, 因此, 必须对系统要求进行估计, 选择合适发光强度的光源。

##### (2) 强度空间分布

一般光源空间各向发光强度是不同的, 在应用中要注意用光强度高的方向作为照明方向, 在要求均匀照明的系统中, 要注意选用各部位发光均匀的光源。

### (3) 灯丝形状及灯泡形状、体积

光源大致有点、线、面三种形状，应根据不同的系统要求选用合适的光源，如投影类仪器的光源常用点光源，以满足平行光的要求，提高测量精度，对计量光栅则可采用点光源或线光源。除此之外，在对仪器的外形和尺寸有要求的场合，灯泡的形状及体积则可能是一个很重要的因素，需要认真加以考虑。

### (4) 光源稳定性的要求

光电测试仪器的种类繁多，检测对象也各不相同，比如有的以脉冲为检测对象，有的以光强为检测对象，还有以相位、频率等作为检测对象的。不同的系统对光源的稳定性有不同的要求，如有些系统对脉冲进行计数作为测量的依据，这种系统中，光源的稳定性可以稍差一些，只要光源的波动不对脉冲的个数产生影响即可，而以光强、光亮度、光通量等作为测量依据的光电系统中，对光源的稳定性要求就比较高。而且不同精度的检测系统对光源的精度要求也不尽相同，应当综合考虑精度、成本等因素，不要盲目追求高的稳定性。

稳定光源发光的方法比较多，可以采用稳压电源供电或稳流电源供电，一般认为后者的稳定性好于前者。还可以用光源采样反馈系统来控制光源的输出，可根据实际情况进行选择。

除以上因素之外，光电测控系统中的光源还有一些其他的要求，如偏振、方向性、发光面积大小、灯泡玻壳的形状和均匀性、发光效率、寿命、电源系统及价格等。这些方面均应视不同的系统要求予以满足。

## 3.1.3 测控系统中的几种常用光源及其特性

在实际工作中，可用的光源种类极其繁多，而光电测控系统中人们最常用的光源大体可分为四类：热辐射光源，主要包括白炽灯、卤钨灯；气体发光光源：如氙灯、钠灯、氖灯、汞灯、氢灯等；固体光源：应用最广的是各种二极管；激光光源，种类繁多，但常用的主要有 He-Ne 激光器，激光二极管等。了解这些常用光源的特性，对光电测控系统的设计和正确使用是非常重要的，本节我们将对这些常用光源做一些简单介绍。

### 1. 自然光源

#### (1) 各种自然辐射源的种类及辐射特性

自然辐射源是指太阳、地球、行星、恒星、云和大气。

##### ① 太阳

大气层外的太阳辐射的光谱分布大致与 5900K 绝对黑体的光谱分布相似，图 3.3 给出了太阳辐射光谱。图 3.4 给出了平均地日距离上，太阳辐射的光谱分布曲线，阴影部分表示在海平面上由于大气所产生的吸收。

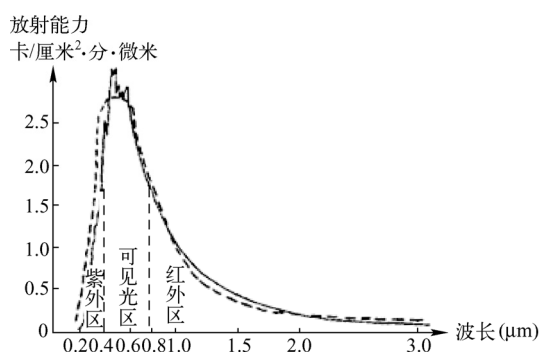


图 3.3 太阳辐射光谱

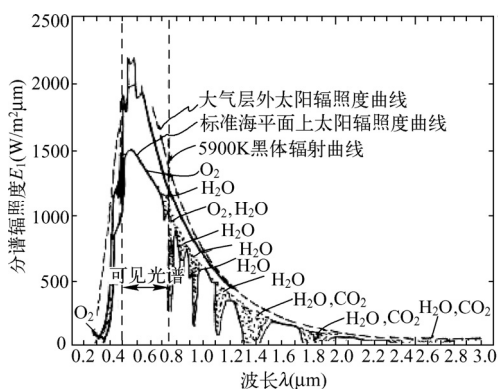


图 3.4 在平均地日距离上太阳的光谱分布

太阳辐射通过大气时，受到大气吸收和散射，照射至地球表面的辐射大多集中在  $0.3\text{--}3.0\mu\text{m}$  的波段，其中大部分集中于  $0.38\text{--}0.76\mu\text{m}$  的可见光波段。照射至地球表面的太阳辐射功率、光谱分布与太阳高度、大气状态的关系很大。随着季节昼夜时间、辐射地域的地理坐标、天空云量及大气状态的不同，太阳对地球表面形成的照度变化范围很宽。表 3.1 给出上述诸多因素对地面照度的影响。在天空晴朗且太阳位于天顶时，地面照度高达  $1.24\times 10^5\text{lx}$ 。

表 3.1 太阳对地球表面的照度

太阳中心的实际高度角/ (°)	地球表面的照度/( $10^3\text{lx}$ )			阴影处和太阳下之比	阴天和太阳下之比
	无云太阳下	无云阴影处	密云阴天		
5	4	3	2	0.75	0.50
10	9	4	3	0.44	0.33
15	15	6	4	0.40	0.27
20	23	7	6	0.30	0.26
30	39	9	9	0.22	0.23
40	58	12	12	0.21	0.21
50	76	14	15	0.18	0.20
55	85	15	16	0.18	0.19
60	102	-	-	-	-
70	113	-	-	-	-
80	120	-	-	-	-
90	124	-	-	-	-

### ② 地球

白天地球表面的辐射主要由反射和散射的太阳光以及自身热辐射组成。因此，光谱辐射有两个峰值，一是位于  $0.5\mu\text{m}$  处由太阳辐射产生，一是位于  $10\mu\text{m}$  处由自身热辐射产生。夜间太阳的反射辐射观察不到，地球辐射光谱分布是其本身热辐射的光谱分布。图 3.5 给出了地面某些物体的光谱辐射亮度，并与  $35^\circ\text{C}$  黑体做比较。

地球辐射主要处于波长  $8\text{--}14\mu\text{m}$  大气窗口，该波段大气吸收很小，成为热成像系统的主要工作波段。地球表面的热辐射取决于它的温度和辐射发射率。地球表面的温度根据不同自然条件而变化，大致范围是  $-40^\circ\text{C}\text{--}40^\circ\text{C}$ 。

地球水面辐射取决于温度和表面状态。无波浪时的水面，反射良好，辐射很小；只有当出现波浪时，海面才成为良好的辐射体。

### ③ 月球

月球辐射主要包括两部分：一是反射的太阳辐射；一是月球自身的辐射。图 3.6 所示为月球自身辐射及反射辐射的光谱分析，月球的辐射近似于  $400\text{K}$  的绝对黑体，峰值波长为  $7.24\mu\text{m}$ 。

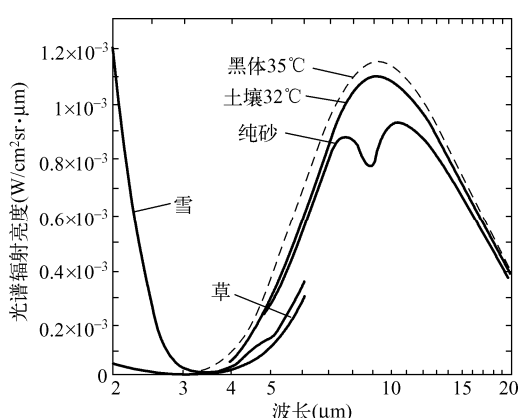


图 3.5 典型地物的光谱辐亮度

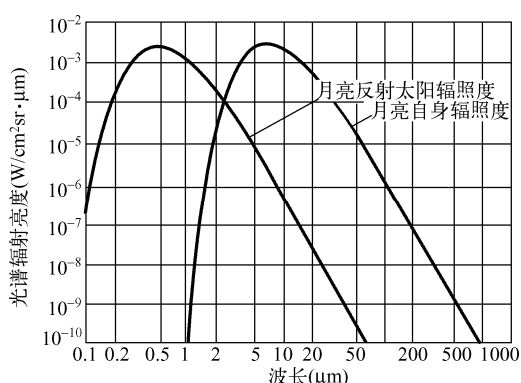


图 3.6 月球自身辐射及反射辐射的光谱分析

月球对地面形成的照度受月球的位相（月相）、地月距离、月球表面反射率、月球在地平线上的高度角，以及大气层的影响，在很大范围内变化。表 3.2 列出了月光产生的地球表面照度值。

表 3.2 月光所形成的表面照度

月球中心的实际高度角 (°)	不同距角 $\phi_e$ 下地平面照度 E(lx)			
	$\phi_e=180^\circ$ (满月)	$\phi_e=120^\circ$	$\phi_e=90^\circ$ (上弦或下弦)	$\phi_e=60^\circ$
-0.8° (月出或月落)	$9.74 \times 10^{-4}$	$2.73 \times 10^{-4}$	$1.17 \times 10^{-4}$	$3.12 \times 10^{-5}$
0°	$1.57 \times 10^{-3}$	$4.40 \times 10^{-4}$	$1.88 \times 10^{-4}$	$5.02 \times 10^{-5}$
10°	$2.34 \times 10^{-2}$	$6.55 \times 10^{-3}$	$2.81 \times 10^{-3}$	$7.49 \times 10^{-4}$
20°	$5.87 \times 10^{-2}$	$1.64 \times 10^{-2}$	$7.04 \times 10^{-3}$	$1.88 \times 10^{-3}$
30°	0.101	$2.83 \times 10^{-2}$	$1.21 \times 10^{-2}$	$3.23 \times 10^{-3}$
40°	0.143	$4.00 \times 10^{-2}$	$1.72 \times 10^{-2}$	$4.58 \times 10^{-3}$
50°	0.183	$5.12 \times 10^{-2}$	$2.20 \times 10^{-2}$	$5.86 \times 10^{-3}$
60°	0.219	$6.13 \times 10^{-2}$	$2.63 \times 10^{-2}$	.....
70°	0.243	$6.80 \times 10^{-2}$	$2.92 \times 10^{-2}$	.....
80°	0.258	$7.22 \times 10^{-2}$	$3.10 \times 10^{-2}$	.....
90°	0.267	$7.48 \times 10^{-2}$	.....	.....

④ 星球

星球的辐射随时间和在天空的位置等因素变化，但在任何时刻它对地球表面的辐射量都是很小的。在晴朗的夜晚，星对地面的照度约为  $2.2 \times 10^{-4} \text{lx}$ ，相当于无月夜空实际光量的 1/4 左右。

星的明亮用星等表示，以在地球大气层外所接收的星光辐射产生的照度来衡量，规定星等相差五等的照度比刚好为 100 倍，所以，相邻的两星等的照度比为  $\sqrt[5]{100} = 2.512$  倍。星等的数值越大，照度越弱。作为确定各星等照度的基准，规定零等星的照度为  $2.65 \times 10^{-4} \text{lx}$ ，比零等星亮的星，星等是负的，且星等不一定是整数。

若有一颗  $m$  等星和一颗  $n$  等，且  $n > m$ ，则两颗星的照度比：

$$E_m / E_n = (2.512)^{n-m} \tag{3.11}$$

或 
$$\lg E_m - \lg E_n = 0.4(n - m) \tag{3.12}$$

根据零等星照度值，可求出其他星等的照度值。

⑤ 大气辉光

大气辉光产生在 70km 以上的大气层中，是夜天辐射的重要组成部分。不能达到地球表面的太阳紫外辐射在高层大气中激发原子并与分子发生低几率碰撞，是大气辉光产生的主要原因。

大气辉光由原子钠、原子氧、分子氧、氢氧根离子以及其他连续发射构成（大气辉光的光谱分布见图 3.7）。0.75~2.5 $\mu\text{m}$  的红外辐射主要是氢氧根的辐射。大气辉光的强度变化受纬度、地磁场情况和太阳骚动的影响。

由于 1~3 $\mu\text{m}$  短波红外波段具有较高的大气辉光，加之处于大气窗口以及 1.54 $\mu\text{m}$  激光器的使用，使 1~3 $\mu\text{m}$  成为新的夜视成像波段。

⑥ 夜天空辐射

夜天空辐射由上述各种自然辐射源共同形成。夜天空辐射除可见光辐射外，还包含丰富的近红外辐射，正是微光夜视系统所利用的波段。夜天空辐射的光谱分布在有月和无月时差别很大。有月夜空辐射的光谱分布与太阳辐射的光谱相似，无月夜空辐射的各种来源所占百分比是：星光及其散射光 30%；银河光 5%；黄道光 15%；大气辉光 40%；后三项的散射光 10%。

夜天空辐射的光谱分布如图 3.8 所示。无月星空的近红外辐射急剧增加，比可见光辐射强得多，这就要求像增强器和微光摄像管的光谱响应向近红外延伸，以便充分利用 1.3 $\mu\text{m}$  以下波长的近红外辐射。在夜光辐照下，不同天气条件下地面景物照度列于表 3.3。

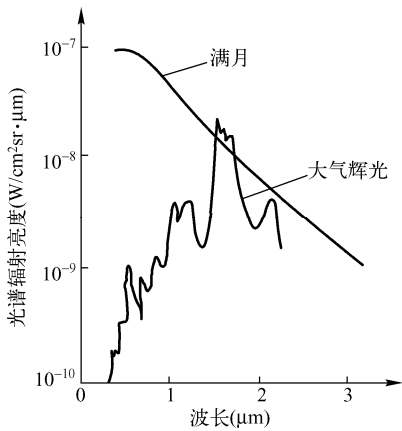


图 3.7 大气辉光的光谱分布

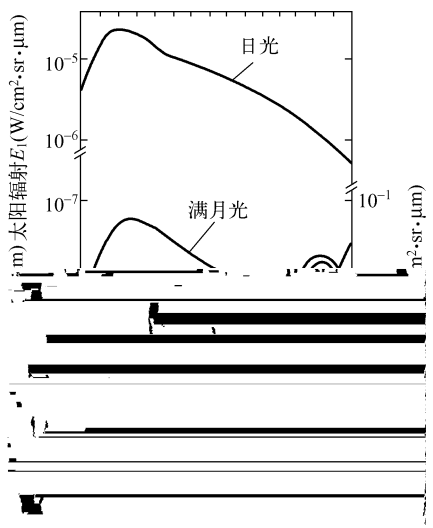


图 3.8 夜空辐射的光谱分布

## (2) 地面长波辐射

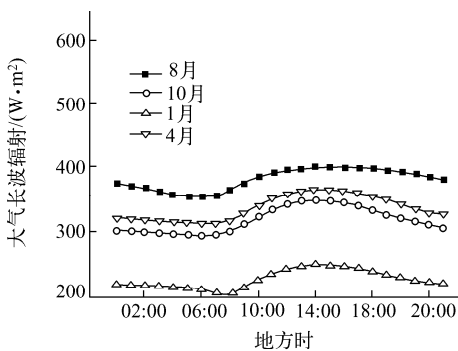
地面向上长波辐射可以表示为

$$U = \varepsilon \delta T_0^4 \quad (3.13)$$

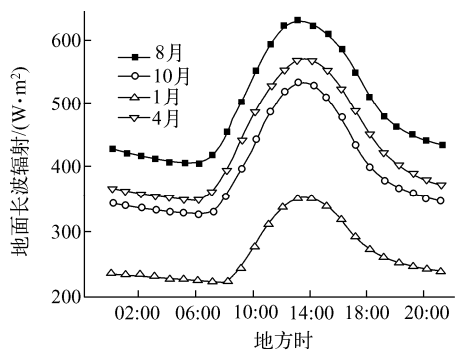
式中,  $\varepsilon$  为地表比辐射率,  $\delta$  为斯蒂芬-波耳兹曼常数,  $T_0$  为地表温度。由式 (3.13) 可知, 地面长波辐射与地表温度的变化相一致, 在地表性质大致相似的情况下,  $T_0$  的大小决定了  $U$  值的强弱, 图 3.9 所示为新疆塔中地面及大气长波辐射平均日变化。

表 3.3 不同自然条件下表面景物照度

天气条件	景物照度 (lx)	天气条件	景物照度 (lx)
无月浓云	$2 \times 10^{-4}$	满月晴朗	$2 \times 10^{-1}$
无月中等云	$5 \times 10^{-4}$	微明	1
无月晴朗 (星光)	$1 \times 10^{-3}$	黎明	10
1/4 月晴朗	$1 \times 10^{-2}$	黄昏	$1 \times 10^2$
半月晴朗	$1 \times 10^{-1}$	阴天	$1 \times 10^3$
满月浓云	$2 \sim 8 \times 10^{-2}$	晴天	$1 \times 10^4$
满月薄云	$7 \sim 15 \times 10^{-2}$		



(a) 地面长波辐射



(b) 大气长波辐射

图 3.9 新疆塔中地面及大气长波辐射平均日变化

## 2. 热辐射光源

热辐射光源是基于物体的受热辐射原理而制作的光源, 测试仪器中的热辐射光源一般都是用电源激励发光的, 因此可以归入电致发光中。常用的热辐射光源主要是白炽灯, 卤钨灯和硅碳棒, 下面对这几种光源做一些比较详细的介绍。

### (1) 白炽灯

白炽灯是根据电流热效应原理工作的, 靠钨丝被加热至白炽状态而发光, 普通白炽灯由螺旋灯丝 (钨丝)、支架、引线、泡壳和灯头等几部分组成。钨丝两端由导线引出, 焊在灯头上, 接通电



路，钨丝被灼热到 2500K 左右就发白光。其光谱连续且范围宽，图 3.10 所示为白炽灯的相对光谱功率分布，在正常工作状态下紫外辐射和可见光辐射的比率较小。白炽灯的发光可靠，原理简单，寿命较长，成本低，品种规格繁多，亮度调节方便，使用稳压电源时，具有较高的稳定性。常用的白炽灯分为真空灯和充气灯两类，真空灯是将玻壳内气体抽出而制成，因为高温状态下钨原子会蒸发，因此发光温度较低，约在 2400K~2600K 之间，效率不高，约为 10~15 lm/W。经过研究得知，大约在 6500K 时，可见光在总辐射能中所占的比例最大，约为 43%。理论上发光效率可达 85 lm/W。所以提高钨丝白炽灯的温度不仅可以提高它的发光效率，而且还可以改善发光颜色。但随温度升高，钨的蒸发率急剧增大，在 2800K 时，钨的蒸发率比 2000K 时加快 100 万倍，为了减少钨丝的蒸发，经常在灯泡内填充一些惰性气体，如充氮或氩、氙、氙气等，这便是充气灯。充气后，由于惰性气体分子与蒸发出来的钨原子碰撞，使一部分钨原子回到灯丝上，有效地减少了钨丝的蒸发，因而延长了白炽灯的寿命，同时相对真空灯允许有更大的电流，更高的温度和相对较高的效率，其工作温度约为 2700K~3000K，发光效率也提高到了 17~20 lm/W。

白炽灯的功率范围很广，电压从几伏到数百伏，功率从零点零几瓦到数百瓦不等，外形各异，有球形、蘑菇形、烛形、指形、鸭梨形等各种分类，球形外形如图 3.11 所示，另外白炽灯的灯丝形状易于加工控制，可以满足具有不同的灯丝形状要求的应用场合，选择余地比较大。但总的来讲，白炽灯的效率不高，功率也受限制，主要用于小功率照明场合。在低于其额定电压情况下使用可以延长其寿命。如额定电压为 6V 的灯泡在 3.5V 的工作电压下，寿命可延长约 20 倍。白炽灯的另一特性是灯丝的电阻特性，一般情况下，灯丝的工作电阻是其冷电阻的 12~16 倍，所以，灯泡启动瞬间有较大电流，在一些特殊应用场合应考虑这个瞬时电流。表 3.4 给出了白炽灯的一些相关属性。

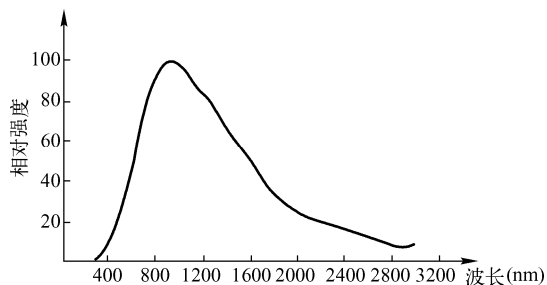


图 3.10 白炽灯的相对光谱功率分布

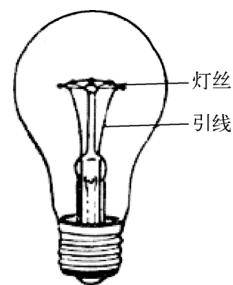


图 3.11 白炽灯外形图

表 3.4 白炽灯相关属性

电压 (V)	功率 (W)	光通量 (lm)	光效比 (L/W)	寿命 (h)	直径 (mm)	长度 (mm)	色温 (K)
2.4	1.008	13.83	13.72	10	3.0	10	3000
3.6	1.224	22.63	18.49	20	3.0	10	3000
1.5	0.025	0.099	3.96	500	2.0	6.0	3000
21	0.42	0.414	0.98	25000	2.5	5.0	3000
110/220	60	630	10.5	1000	35	97	
220	100	10.25	10.25	1500	60	104	2800
110/220	200	3200	16	1000	75	104	

## (2) 卤钨灯

为了进一步延长灯泡的寿命，提高其发光效率，人们将卤族元素充入玻壳中，制成卤素灯，如图 3.12 所示为单端卤钨灯。灯泡中充入卤族元素后，灯丝发热挥发时，卤族元素与钨原子在玻壳附近形成易挥发的卤族化合物，这种化合物又在灯丝附近分解，钨原子又重新分解出来沉积到灯丝

上, 如此循环, 从而延长了灯丝的寿命, 也防止了玻壳发黑, 使灯泡在整个生命周期的光通量维持在 90% 以上, 但卤钨灯存在一个反转温度, 高于这个温度时, 玻壳内钨元素会出现过剩导致灯泡发黑, 影响效率。

为了使管壁处生成的卤化钨处于气态, 卤钨灯的管壁温度需要比普通白炽灯高出很多, 因此其功率也要高出白炽灯很多, 和白炽灯相比, 卤钨灯是一种较大功率的照明器件, 因此卤钨灯多用于大功率照明的场合。

目前实践中已大量应用的卤钨灯包括碘钨灯和溴钨灯两大品种, 卤钨灯的产品规格繁多, 电压从几伏到上百伏, 功率从几瓦到数千瓦不等。按结构又可分为单端和双端, 按发光面形状有点、线、面型。卤钨灯的工作温度可达 3300K, 效率能提升到 30lm/W。卤钨灯具有白炽灯的一切优点, 但体积更小, 效率更高, 寿命更长 (由美国斯格纳托勒公司推出的金属卤素灯可达 3~4 万小时), 稳定性更好, 主要用于光学仪器, 光刻等投影装置。表 3.5 列出了卤钨灯的相关属性。

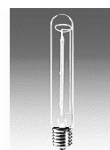


图 3.12 单端卤钨灯

表 3.5 卤钨灯相关属性

电压 (V)	功率 (W)	光通量 (lm)	色温 (K)	平均寿命 (h)	直径 (mm)	全长 (mm)
110/220	100	1500/1650	2700	2000	-	78
220	200	3520	2900	2000	11	117
220	500	9900	2900	2000	11	117
220	1000	24200	2900	2000	11	189
220	1500	36300	2900	2000	11	254
220	2000	48400	2900	2000	11	334
110/220	1000	20000	2700	2000	47	260

### (3) 碳硅棒

碳硅棒是一种非金属电热元件, 可以用作红外光源。在做成圆柱形的碳化硅棒两端套上金属帽, 构成电极用于导电, 当电流通过圆柱棒时将其加热, 从而可在超过 1000℃ 下产生辐射, 在 1250~1375K 的色温和 2~12μm 的波长范围内, 其光谱发射率从 0.75 变化到 0.95, 不过其光谱发射率也会随使用而发生变化。碳硅棒作为一种红外光源, 运行可靠, 控制方便, 温控精度高。不过其两端的电极在工作状态下需通过加热棒的壳体进行水冷, 另外其价格较高, 这种复杂的水冷形式和较高的价格是其主要缺点。

### 3. 气体放电光源

气体光源是用气体放电原理制成的, 将两个电极密封在玻壳中, 再充入一些特殊气体 (氙, 氩, 汞等), 通过电极放电将气体电离, 电离出离子和电子, 离子和电子在电场力作用下各自向两个电极运动, 与更多的原子碰撞, 产生出更多的电子和离子, 这个过程中, 一些原子会被激发到激发态, 激发态是一个不稳定的状态, 在从激发态回到低能级时, 原子便辐射出电磁波, 这个过程反复进行, 就是气体光源的发光原理。由于辐射机理的不同, 气体光源有一些不同于热辐射的独特特性。

- 发光效率高, 如高压汞灯的发光效率最高可达 60 lm/W 以上, 而高压钠灯更可以达到 90 lm/W, 远远高出普通白炽灯的发光效率。
- 寿命长, 如一般钠灯或汞灯的寿命在 2500 小时以上。
- 覆盖光谱范围大, 如汞灯可以发出 254nm 远紫外线, 普通高压汞灯的光谱成分中包括长波紫外线、中波紫外线、可见光谱及近红外光辐射, 其 (汞灯的) 发射谱线的几个峰值约在 400~550nm 之间。氙灯则接近日色。

● 结构紧凑，耐震耐冲击。

鉴于以上特点，气体放电灯被广泛应用于光电测控系统和工程照明中，下面我们将对几种常用的气体放电光源做简要介绍。

### (1) 氙灯

利用高压和超高压惰性气体放电可制成一类效率很高的光源，其中以氙灯最为常用，氙灯可分为短弧氙灯、长弧氙灯和脉冲氙灯三种，其相关属性如表 3.6 所示。

表 3.6 氙灯相关属性

型号	灯管型式	光窗材料	光谱分布 (nm)	最低触发直流电压 (V)	灯管电压直流 (V)	灯管电流直流 (mA)	光中心高度 (mm)	灯丝参数				
								预热状态			工作状态	
								电压	电流	时间	电压	电流
								(V)	(A)	(S)	(V)	(A)
DD2.5	普通	石英	160~400	350	80	300	50	2.5	4	10~60	0~1	0~1.8
DD2.5A	凸窗	石英	160~400	350	80	300	50	2.5	4	10~60	0~1	0~1.8
DD2.5B	带座	石英	160~400	350	80	300	50	2.5	4	10~60	0~1	0~1.8
DD10	普通	石英	160~400	350	80	300	50	10	0.8	10~60	0~3.5	0~0.3
DD10A	凸窗	石英	160~400	350	80	300	50	10	0.8	10~60	0~3.5	0~0.3
DD10B	带座	石英	160~400	350	80	300	50	10	0.8	10~60	0~3.5	0~0.3

### ① 长弧氙灯

电极间距在 1.5~130cm 的氙灯称为长弧氙灯，一般是细管型，工作气压一般为一个大气压，光效在 24~37 lm/W 之间，水冷式长弧氙灯的发光效率更可高达 60 lm/W，其结构如图 3.13 所示。长弧氙灯的显色性较好，显色指数可达 95，色温为 5500K~6000K，寿命达 3000 小时以上，功率可达  $10^2 \sim 2 \times 10^6$ W，一般工作以前需要预热，预热时间约为几分钟。

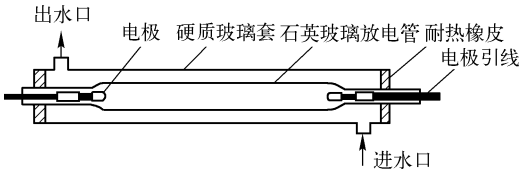


图 3.13 水冷式长弧氙灯结构

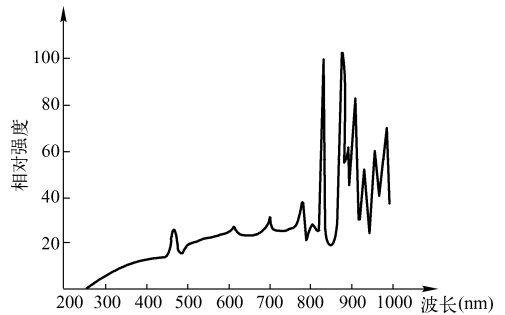


图 3.14 长弧氙灯光谱能量分布

长弧氙灯辐射的光谱能量分布和日光接近，如图 3.14 所示，由于这个特点，它可用作电影摄影、彩色照相制版、复印及植物栽培等的光源，高功率的氙灯还可作为连续激光的泵浦。表 3.7 列出了长弧氙灯的相关属性。

表 3.7 长弧氙灯相关属性

功率 (W)	电源电压 (V)	工作电流 (A)	外径 (mm)	全长 (mm)	光通量 (lm)	色温 (K)	平均寿命 (h)
400	45	9	12	220			1000
1500	60	20	20	350			1000
3000	220	14±2	15±1	680±20	66000~51000	5000±500	500
3000	220	27±3	19±1	1070±10	132000~102000	5000±500	500
6000	220	27±3	9±0.4	425±8	210000~180000	5000±500	500
10000	220	46±4	25±1	1420±50	200000~250000	5500	1000
20000	220	92±8	32±2	1700±50	432000~540000	5500	1000

## ② 短弧氙灯

电极间距在毫米级的氙灯称为短弧氙灯，外表一般呈现球形，如图 3.15 所示，工作气压约为 1~2MPa，一般采取直流供电方式，其电弧亮度更高。短弧氙灯中，氙蒸汽的浓度更高，电离度更大，由于谱线的压力加宽和多普勒加宽作用，光谱更趋于连续。图 3.16 是短弧氙灯的光谱能量分布，与太阳的光谱很接近。短弧氙灯近似为高亮度点光源，其阴极点的最大亮度可达几十万坎德拉每平方厘米，阳极要低一个数量级，很不均匀。短弧氙灯的光色好，显色指数可达 95 以上，启动时间短，色温为 6000K 左右。其功率从数十瓦到上万瓦不等，短弧氙灯常用于电影放映，模拟日光灯，探照灯，模拟太阳光等。小功率短弧氙灯则用于各种光学仪器。表 3.8 列出了短弧氙灯的相关属性。

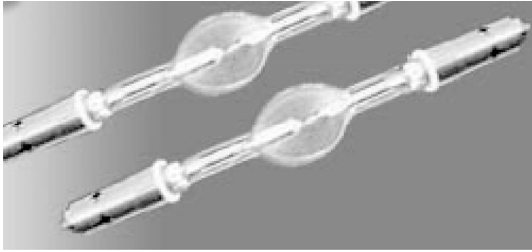


图 3.15 球形超高压电弧氙灯

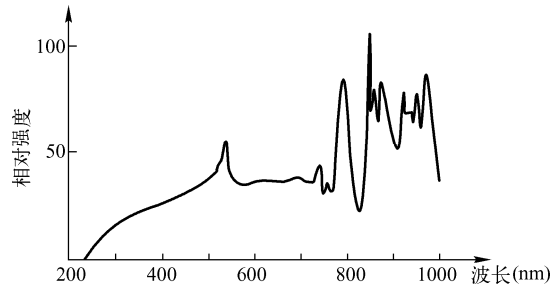


图 3.16 短弧氙灯光谱能量分布

表 3.8 短弧氙灯相关属性

功率 (W)	电源电压 (V)	初始光通量 (lm)	最大直径 (mm)	全长 (mm)	光中心高度 (mm)	寿命 (h)	冷却
150	大于 50	3000	19	150	62	500	自然
500	65	14500	30	175	73	500	自然/风冷/水冷
1000	65	30000	45	320	125	1000	自然/风冷/水冷
2000	65	70000	53	370	145	800	风冷/水冷
3000	75	110000	55	410	170	800	水冷
4000	85	180000	60	420	170	800	水冷
5000	85	240000	70	420	175	800	水冷
7000	62	310000	75	485	185	500	水冷

## ③ 脉冲氙灯

脉冲氙灯是非稳定的气体放电形式之一，其发光是非连续的，它用高压脉冲激发产生光脉冲，类似于火花放电，可使人们在瞬时 ( $10^{-9} \sim 10^{-12}$ s) 获得除激光外最大的光通量 ( $10^9$ lm) 和亮度，脉冲氙灯的发光效率约 40 lm/W，色温很高，约为 7000~9000K，脉冲氙灯的光谱特性也接近日光，电压增加使峰值波长向短波移动。

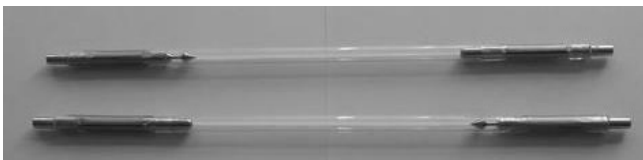


图 3.17 脉冲氙灯

脉冲氙灯操作简便，耗电少，工作稳定，谱线宽，光强大，常用作激光器的泵浦光源。其产品外形如图 3.17 所示，管长一般在十几到二十几厘米，管外径约为几个毫米。脉冲氙灯在工作时，在

瞬时强电流作用下，可受到强大冲击，加上放电引起的热量，极易造成管壁的损坏，因此脉冲氙灯一般工作在极限条件之下，以延长寿命。如果使用方法得当，闪光次数可达 100 万次以上。表 3.9 列出了闪光能量与预期的工作寿命的关系。还有一种脉冲氙灯，称为频闪管，它不像光泵氙灯那样每秒只闪几次，或一两分钟内一次。频闪管的能量小，闪得快，每秒钟闪 1000 次左右，一般用在科研上、工业上测高速旋转的转速。

表 3.9 脉冲氙灯闪光能量和寿命的关系

闪光能量 (相对极限负载的百分数)	寿命 (闪光次数)
100	1-10
70	10-100
50	100-1000
40	1000-10000
30	10000-100000

## (2) 汞灯

汞灯是利用水银蒸气放电发光的一类气体放电光源，根据蒸气气压的大小可分为低压汞灯、高压汞灯、超高压汞灯三类。

### ① 低压汞灯

低压汞灯的管内压强很小，工作电压也不高，一般在数十伏到 220 伏，功率在数十瓦，一般小于 100 瓦，工作温度不高 ( $40\sim 50^{\circ}\text{C}$ )，发光效率为  $40\sim 50\text{ lm/W}$ ，寿命一般在 2500 小时以上，外形如图 3.18 所示。在  $0.8\text{ Pa}$  时，辐射波长集中在  $253.7\text{ nm}$  处。低压汞灯种类很多，根据阴极材料的不同，可分为冷阴极汞蒸汽辉光灯和热阴极水银荧光灯，各种冷阴极汞灯光谱能量输出都基本相同。如图 3.19 所示，辐射能大部分集中在  $253.7\text{ nm}$ 。它是汞的最灵敏的共振辐射线。因此，它常用作紫外单色光源或用于灭菌、荧光分析上，电极电压降一般为  $100\sim 150\text{ V}$ 。热阴极汞灯是弧光放电型低压汞灯。在灯壁上涂以荧光薄层，通过涂以不同的荧光物质，将紫外波段吸收 ( $253.7\text{ nm}$  及  $185\text{ nm}$ ) 后，转换成所需波段，常见的这种类型的灯有日常照明的荧光灯，各种颜色的园艺灯等。

低压汞灯应在额定电压下点燃使用，点燃时应配上符合要求的限流器。使用时须保持适当的通风或散热，否则会影响灯泡的正常使用。此外，工作人员应戴防护眼镜，以免烧伤眼睛。

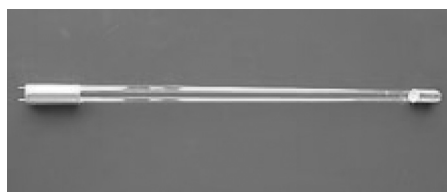


图 3.18 紫外线低压汞灯

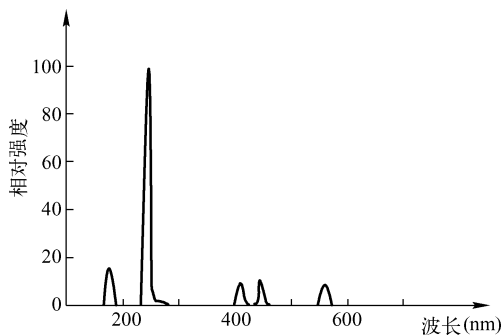


图 3.19 低压汞灯的光谱

### ② 高压汞灯

高压汞灯管内压强一般为  $1\sim 5$  个大气压，高压汞蒸汽放电的光效可达  $40\sim 50\text{ lm/W}$ ，最高可达  $64\text{ lm/W}$ ，寿命一般在 2500 小时以上，可达 5000 小时，功率从几十瓦直至上万瓦，应用很广。如图 3.20 所示，其光谱成分中包括长波紫外线、中波紫外线、可见光谱及近红外光谱，与低压汞灯相比高压汞灯的光谱更为丰富，在高压汞灯的辐射中，可见光约占总辐射的 37%。而低压汞灯在最佳条件下可见光才占总辐射的 2% 左右。但高压汞灯的紫外辐射明显减弱，这主要是因为在高气压阶段，原子的相互作用加强。另外高压汞灯发光体积更小，亮度高，光效也更高。其发出的可见光偏蓝绿，缺少红色成分，所以显色性较差，在要求较高的场合不适宜应用，但可通过添加不同的荧光粉来改善灯的光色。

高压汞灯可分为外镇式高压汞灯和自镇流高压汞灯，自镇流高压汞灯不需要外接镇流器，而外

镇式高压汞灯必须与相应的镇流器和电容（触发器）配合使用，一般其发光效率和寿命都要高于自镇流高压汞灯。

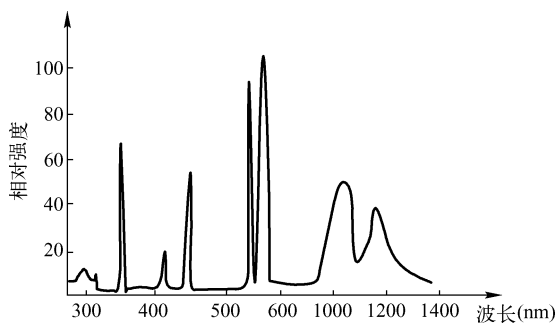


图 3.20 高压汞灯光谱能量分布

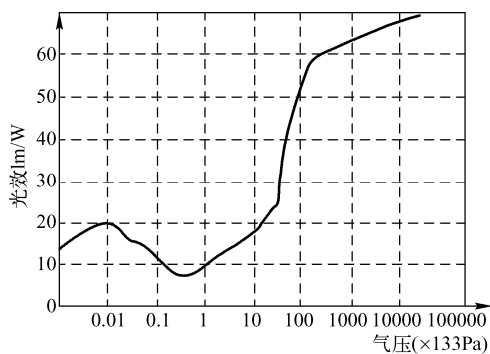


图 3.21 汞蒸汽压与发光效率关系曲线

高压汞灯的发光效率与管内蒸汽压力的关系如图 3.21 所示，在气压较低时，光效和气压没有明显的比率关系，但在 1.5 个大气压以后，光效随气压的上升而单调上升，在 100~1000 个大气压段，更呈现出急剧上升的特点。

高压汞灯的启动时间较长，一般为 4~10 分钟，另外，高压汞灯熄灭以后，不能立即启动。因为灯熄灭后，内部还保持着较高的汞蒸气压，要等灯管冷却，汞蒸气凝结后才能再次点燃。冷却过程需要 5~10 分钟。图 3.22 所示为高压汞灯结构示意图，除此之外，高压汞灯还有球形、管形、椭圆形、U 形、反射型等。表 3.10 列出了高压汞灯的相关属性。

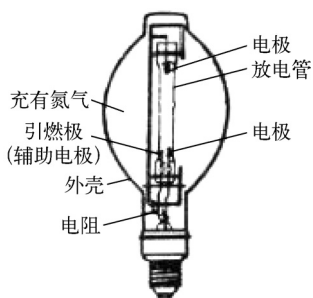


图 3.22 高压汞灯

表 3.10 高压汞灯相关属性

电压 (V)	功率 (W)	光通量 (lm)	管径 (mm)	全长 (mm)	寿命 (h)
220	80	3200	71	170	5000
220	125	5500	81	189	5000
220	250	12000	91	232	6000
220	400	21000	122	297	6000
220 (自镇流)	125	1600	81	189	3000
220 (自镇流)	250	4900	91	232	3000
220 (自镇流)	450	11000	122	297	3000

### (3) 钠灯

人类早在 1965 年就发明了钠灯，钠灯是一种很重要的人造光源，它是一种气体放电灯。如果按灯泡中钠蒸气压强的高低来分则可分为高压钠灯与低压钠灯两种；按结构又可分为内触发、外触发、单端、双端、标准型、双内管型等；按性能特性分为快启动型、高显色型等。它们是一种高效节能新型光源，具有光效高、透雾性强、寿命长等特点。目前低压钠灯除用于偏振仪、旋光仪等光学仪器外，也用于照明；高压钠灯则多用于道路、广场、隧道、港口、码头、车站等室外的照明。

#### ① 低压钠灯

低压钠灯是利用低压钠蒸气放电发光的单色光源。当通电后，在电弧管两端电极之间产生电弧，对钠加热使之变为钠蒸气，但这种灯的钠蒸气非常稀薄，工作时其发光管内的蒸气压强不超过 5Pa，甚至小到 1Pa，显然这是因稀薄气体受激发而产生的原子光谱（即线光谱），因此低压钠光灯的光谱在可见光区域内有两条极强的谱线，波长分别为 589nm 和 589.6nm，正是因为这样，低压钠灯与低压汞灯的主要不同之处，就在于其辐射谱线位于人眼的时间函数的最大值附近。所以不需要像低压水银荧光灯那样需要用荧光粉把 253.7nm 的紫外辐射转变为可见光，从而避免了由于荧光粉

造成的能量损失。

低压钠灯的功率从数十瓦到几百瓦不等，启动电压较高，对功率在 45W 以上的规格中，其启动电压一般大于 220V。低压钠灯工作时应将放电管保持水平，这样钠的分布均匀，发光效率也较高。垂直点燃时，灯的下部温度较低，由于重力作用，钠会沉降在底部，造成上半部缺钠而发光效率下降，对于有储钠泡的钠灯，可以在偏离水平位置  $20^\circ$  以内的位置点燃。

低压钠灯的发光效率是气体放电灯中最高的，理论上可达到  $300\sim 340\text{ lm/W}$ ，但由于很难在实际应用中达到假设的理论条件，因此实际制成的钠灯的发光效率仅可达到  $180\sim 220\text{ lm/W}$ 。低压钠灯的寿命较长，可达 5000 小时以上，仅次于高压钠灯，但由于低压钠灯发出的是单色黄光，因此其显色性较差，可用作理想的仪器单色光源，但其波长较长，易衍射，透雾性较好，所以也比较多地用于对光源颜色要求不高的照明场所。

## ② 高压钠灯

高压钠灯是利用高压钠蒸气放电发光的电光源，如图 3.23 所示，它的结构是由电弧管、灯芯、玻壳、灯头、吸气剂、汞、氙气及主要成分钠组成的。灯芯是采用金属支架将电弧管、吸气剂环等固定在芯柱上。电弧管是由半透明多晶氧化铝和陶瓷管做成的。玻壳是由耐高温、防钠腐蚀的硬料玻璃或陶瓷制造的。灯头的材料一般由黄铜制成，它可与灯座保持较小的接触电阻，并能减轻金属表面氧化层。吸气剂用来吸收灯泡中的一些易氧化灯管元件的杂质或气体。另外，在电弧管中加入适量的汞，其作用主要是提高灯管工作电压，降低工作电流，减小镇流器体积，改善电网的功率因数，增高电弧温度，提高辐射功率。

当钠灯通电启动后，在电弧管两端电极之间便产生电弧，由于电弧的高温作用使管内的钠、汞一起受热蒸发成为汞蒸汽和钠蒸汽，阴极发射的电子向阳极运动过程中，撞击放电物质的原子，使其获得能量产生电离或激发跃迁，然后再由激发态回复到稳定态，或由电离态变为激发态，再回到基态而无限地循环，那么多余的能量则以光辐射的形式释放出来，这便产生出了各种频率的光。从上边的描述中可以看出，低压钠灯的特点是发光的单色性较好，而在高压钠灯工作过程中，由于玻泡中放电物质蒸气压很高，也就是游离的钠原子密度高，电子与钠原子之间碰撞次数频繁，从而使辐射的谱线加宽，也就会出现其他可见光谱的辐射。显然高压钠这种光谱是一种连续光谱，其分布如图 3.24 所示，这和高压汞灯的谱线加宽是类似的。

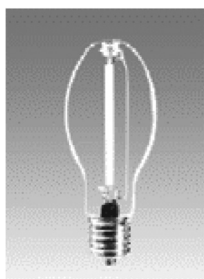


图 3.23 北美标准高压钠灯

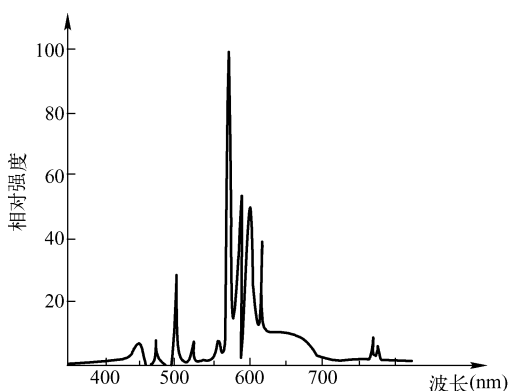


图 3.24 标准型高压钠灯的光谱

高压钠灯的功率从几十瓦到上千瓦不等，选择余地比较大。经济性比较好，有人评论说在人的肉眼能够分辨颜色的基础上，高压钠灯是普通照明光源中最经济的选择。另外高压钠灯的光效比较高，是高压气体放电灯中最高的，仅次于低压钠灯，可达  $120\text{ lm/W}$ 。其实在实际应用中，由于灯泡玻壳的不够清洁造成的光效下降往往是光通量损失的主要原因，不光是钠灯，在所有照明灯具中都

存在这个问题，应多加注意。

高压钠灯的寿命比较长，最高可达到 1 万小时以上。但其实际使用寿命远远低于理论寿命，影响其寿命的因素很多，这就要求我们使用时要注意一些事项，尽可能延长其寿命。首先，灯泡必须与电源电压相配的镇流器配套使用。电压长时间波动一般不允许超过  $\pm 3\%$ ，短时间波动的允许范围为  $\pm 10\%$ 。如果电压波动经常超过  $\pm 10\%$ ，会降低灯泡的寿命。如果电压波动长时间超过  $\pm 10\%$ ，灯会周期性地在一个高点燃电压下自熄。另外必须尽量选择质量良好的触发器，有些劣质触发器产品在 100~120 伏的灯电压下就给出触发脉冲，严重干扰灯的正常工。另外有时触发脉冲过强，而触发回路绝缘性能稍差，造成触发能量损耗，由此导致启动性能合格但启动电压偏高的灯不能点燃。这些都会影响灯泡的使用寿命。表 3.11 给出了高压钠灯的相关属性。

表 3.11 高压钠灯相关属性

功率 (W)	光通 (lm)	电源电压 (V)	工作电流 (A)	平均寿命 (h)	直径 (mm)	全长 (mm)	色温 (K)
35	2200	120	0.83	16000	55	138	2000
70	6000	120	1.6	24000	55	138	2000
100	9000	120	2.1	24000	55	140	2000
250	28000	220	3.0	24000	91	227	2000
400	48000	220	4.6	24000	122	285	2000
1000	130000	480	4.7	24000	80	380	2000

#### (4) 氢灯

氢灯是一种冷阴极辉光放电管，一般是将一对镍制电极封于硬质玻壳中，将管内充入高纯度氢气，当加高压启动后，便可发出氢的特征谱线，当氢气压力为  $10^2\text{Pa}$  时，用稳压电源供电，放电十分稳定，因而光强恒定。氢气放电灯在波长 160nm~375nm 范围内发出连续光谱，但在 165nm 以下为线光谱。在波长大于 400nm 时，氢放电会产生叠加于连续光谱之上的发射线，其主要谱线为：410.18nm, 434.05nm, 486.13nm, 656.28nm，被广泛应用于棱镜折射仪、干涉仪等光学仪器中，作为单色光源使用。

#### (5) 氙灯

氙灯是一种紫外光源，是一种热阴极弧光放电灯，外壳一般用透紫外性能良好的优质石英做成，将一只阳极和一只阴极封在其中，泡壳内充入高纯度的氙气。当氙灯工作时，即灯丝通电加热后，发射出自由电子，这时，自由电子在电场的加速下向阳极运动。在这过程中，自由电子与氙分子发生非弹性碰撞，使氙分子处于激发态，当其返回原来的状态或较低的能态时，就以辐射的形式放出能量而发光。氙灯能产生波长 160~400nm 内的连续辐射，如图 3.25 所示，其下限由拉曼 (Raman) 分子的线辐射决定，上限由巴尔麦 (Balmer) 线谱限制。

氙灯的种类很多，按窗口的形式分类可以分为端窗和侧窗两种，图 3.26 为一种典型结构。虽然因使用的要求和加工的工艺不同每种氙灯有所不同，但其基本的结构和性质是相同的。氙灯窗口由熔融石英、紫外透过玻璃、人造合成石英和氟化镁等材料作成。侧窗类型的氙灯种类非常繁多，主要用于各种紫外光谱仪器中，但是选择性能比较好的也可以作为标准灯使用。特别是在 200nm 以上的波长范围经常使用侧窗氙灯做标准灯。端窗类型的氙灯主要被人们用作紫外特别是真空紫外的标准灯，根据不同的需要灯的外壳可以采用不同的材料，窗口也可以采用不同的材料和形状。如 Cathodeon 公司生产的 V 系列氙灯灯窗口用石英或氟化镁两种材料制成，它们都有较高的透射比。石英窗口适用的波长范围是 165nm~400nm，氟化镁窗口的波长范围是 115nm~400nm。不同型号的氙灯结构不完全相同，但基本结构是一致的。

氙灯同氢灯相比具有强度高，稳定性好，寿命长，复现性好，体积小，使用方便等特点，氙灯



的寿命一般可达 1000 小时，甚至有些产品可达 2000 小时。

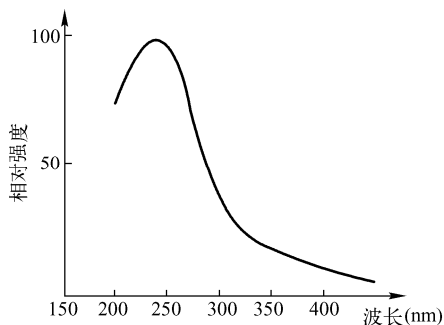


图 3.25 汞灯光谱能量分布

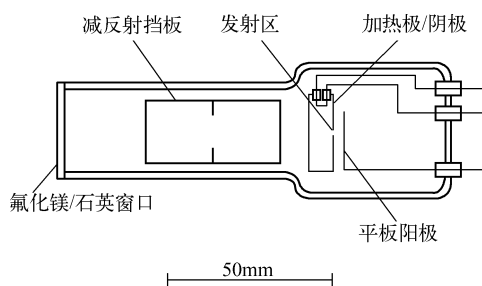


图 3.26 v03 型汞灯简图

汞灯使用中应遵守一定的程序或者说方法，以便充分发挥灯的性能和延长灯的寿命。使用时应当注意以下几点：①汞灯是一种气体放电管。它的阳极在未击穿之前呈高阻特性，一旦击穿立即进入低阻状态。灯丝只是在阳极未击穿之前，发射电子帮助阳极击穿。当阳极一旦击穿灯丝电流应减半或关闭，以延长汞灯寿命。因此汞灯电源应是一种恒流状态下工作的特殊的稳流电源。要求稳定程度应该比较好。②使用前应用酒精棉擦净管壳，尤其是光窗部位，防止手汗、灰尘、油污等沾污管壳。灯点燃后，管壳温度高，沾污不易去除，影响透光率。③使用时应当注意安全，汞气的弧光是强紫外光，应避免直视。④汞灯的预热时间比较长，一般在十到几十分钟，为了让其工作在稳定状态下，使用的时候应多加注意。

#### 4. 受激辐射光源——激光器

激光是一种相干光源，自从发明以来，取得了惊人进展。激光的单色性好，相干能力强，由于激光具有很多优良的特性，使其在工业、农业、科研、医疗、军事、教育、通信及计算机等领域取得了广泛的应用。在光电测试中激光常用作相干光源，在测试中合理使用激光器往往可形成新的方法，从而提高测试测量的精度。激光器的特性如下。

- 方向性：激光有很好的方向性，或者说是高准直的，激光器的方向性用发散角来表示，氦氖激光器的发散角可达  $3 \times 10^{-4} \text{rad}$ ，接近衍射极限。
- 单色性：激光是准单色的，具有很窄的带宽，换句话说就是时间相干的。稳频后 He-Ne 激光器的相干长度可达几百公里。
- 高亮度：激光在很窄的带宽内辐射出很高的光通量，激光把全部能量集中在一个很窄的受衍射限制的光束内输出，用透镜聚焦后，光束的光通密度可达  $10^{17} \text{W/cm}^2$ ，约是太阳表面光通密度的  $10^{13}$  倍。

激光器按工作物质的不同可分为气体激光器、固体激光器、半导体激光器和染料激光器；按工作方式分可分为连续、准连续、脉冲、调 Q 和锁模激光器；按输出光的波段可分为红外、可见、紫外和 X 射线激光器。现在已研制成功的激光器达数百种，波长范围覆盖了近紫外到远红外的各个波段，功率从毫瓦级一直到几千瓦。而光电测控系统中较常用的有气体激光器中的 He-Ne 激光器、半导体激光器及固体激光器中的掺钕钇铝石榴石激光器，下面将重点对这几种激光器做一些介绍。

##### (1) 半导体激光器

如图 3.27 所示，半导体激光器是用半导体材料作为工作物质的一类激光器，较典型的结构如图 3.28 所示，由于物质结构上的差异，产生激光的具体过程比较特殊。常用材料有砷化镓 (GaAs)、硫化镉 (CdS)、磷化铟 (InP)、硫化锌 (ZnS) 等。激励方式有电注入、电子束激励和光泵浦三种形式。



图 3.27 封装好的半导体激光器

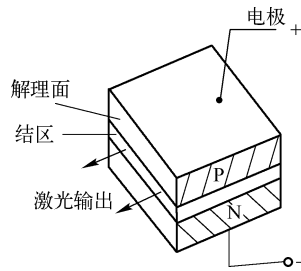


图 3.28 GaAs 半导体激光器结构示意图

目前已开发出并投放市场的半导体激光器的波段有 370nm、390nm、405nm、430nm、480nm、635nm、650nm、670nm、780nm、808nm、850nm、980nm、1310nm、1550nm 等，其中 1310nm、1550nm 主要用于光纤通信领域。405nm~670nm 为可见光波段，780nm~1550nm 为红外光波段，390nm~370nm 为紫外光波段。

半导体 LD 的分类方法很多，有按结构分的，也有按性能参数或波导机制分的，按波导机制分为增益引导型和折射率引导型，按性能参数可分为低阈值 LD、高特征温度 LD、超高速 LD、动态单模 LD、大功率 LD 等，按结构可分为同质结、单异质结、双异质结等几种。同质结激光器和单异质结激光器室温时多为脉冲器件，而双异质结激光器室温时可实现连续工作。但最常见的还是按工艺分，可分为法布里-珀罗 (F-P) 型 LD、分布反馈 (DFB) 和分布布拉格反射器 (DBR) LD、量子阱 (QW) LD 和垂直腔面发射 (VCSEL) LD。

半导体激光器的特性及注意事项如下。

### 1) 阈值电流

当注入 p-n 结的电流较低时，只有自发辐射产生，随电流值的增大增益也增大，达到阈值电流时，p-n 结产生激光。影响阈值的几个因素：

① 晶体的掺杂浓度越大，阈值越小。

② 谐振腔的损耗小，如增大反射率，阈值就低。

③ 与半导体材料结型有关，异质结阈值电流比同质结低得多。目前，室温下同质结的阈值电流大于  $30000\text{A}/\text{cm}^2$ ；单异质结约为  $8000\text{A}/\text{cm}^2$ ；双异质结约为  $1600\text{A}/\text{cm}^2$ 。现在已用双异质结制成在室温下能连续输出几十毫瓦的半导体激光器，已有报道说 QW LD 的阈值可降到 0.268mA，阈值更低的是垂直腔面发射激光器，据称其阈值可以从 1mA 降低到接近  $1\mu\text{A}$ 。

④ 温度越高，阈值越高。100K 以上，阈值随  $T$  的三次方增加。因此，半导体激光器最好在低温和室温下工作。

### 2) 方向性

由于半导体激光器的谐振腔短小，激光方向性较差，在结的垂直平面内，发散角最大，可达  $20^\circ \sim 30^\circ$ ；在结的水平面内约为  $10^\circ$ ，因此用 LD 做平行光照明时应用柱面镜将光束整形，再用准直镜准直。

### 3) 效率

效率包括量子效率和功率效率。量子效率定义为

$$\text{量子效率 } \eta = \text{每秒发射的光子数} / \text{每秒到达结区的电子空穴对数}$$

77K 时，GaAs 激光器量子效率达 70%~80%；300K 时，降到 30%左右。

功率效率定义为

$$\text{功率效率 } \eta_1 = \text{辐射的光功率} / \text{加在激光器上的电功率}$$

由于各种损耗，目前的双异质结器件，室温时的  $\eta_1$  最高 10%，只有在低温下才能达到 30%~40%。