

# 发光强度的基本单位——坎德拉

王 桐

(中国计量科学研究院, 北京 100013)

发光强度的基本单位坎德拉是国际单位制的基本单位之一, 本文较详细叙述了它的定义及其历史演变, 简单介绍了该定义的复现原理、方法和实验装置。我国于 1982 年用电校准辐射计复现发光强度单位坎德拉, 其总的不确定度为  $\pm 0.28\%$ 。最后, 对坎德拉的发展方向作了简要的说明。

坎德拉是发光强度单位, 是国际单位制(SI)七个基本单位之一, 用符号“cd”表示。

众所周知, 光是人类、生物以至自然界赖以生存和发展的一种重要物质。科学家研究发现, 人的眼睛等感觉器官, 从外界接收的全部信息中, 有百分之七十以上来自光。人类对光的认识, 也经历了由现象到本质的发展过程, 光学计量也正是伴随着这一认识过程而产生和发展的。本文仅将发光强度的定义、演变及其复现作一扼要的介绍。

## 一、发光强度的原始定义——烛光

发光强度的原始计量是通过人眼的感觉进行的。大约二百年前, 已经使用“烛光”作为发光强度的单位。它是一支蜡烛在水平方向上的发光强度。如 1860 年, 英国都市气灯法规所采用的“鲸蜡”。后来相继使用的标准光源还有菜油灯、戊烷灯和纯乙酸戊酯灯等。

与此同时, 科学家从理论上探讨了发光强度。1727 年, P. 鲍吉尔发表他的著作《关于光分度的光学实验》, 这无疑可认为是目视光度测量的第一个重要尝试。1760 年, 朗白在他的一部专著中, 详细阐述和定义了光通量、发光强度、照度、亮度等重要的光度学参数, 还阐明了它们之间的数学联系。这些研究工作对光度计量的发展具有重要意义。

1881 年, 国际电工技术委员会根据科学技术的发展和要求, 把“烛光”规定为国际性单位,

并定义如下:

**将一磅鲸鱼油脂制成六支蜡烛, 以每小时 120 格令的速度燃烧时, 在水平方向的发光强度为 1 烛光。**

上述定义中的格令为质量单位。从这个定义可以看出, 发光强度不仅与燃料有关, 而且还与灯芯、火焰高度等因素有关, 因此它的复现性和稳定性都不理想。

1879 年, 维奥列为了避免火焰标准的不方便, 建议采用凝固过程的纯白金槽一平方厘米表面发出的光强度作为发光强度标准。由于各种原因(例如铂的纯度不高等), 使得其重复性较差, 未能采用。但这种想法对后来的光度的发展有一定的影响。

1879 年, 爱迪生发明白炽灯, 人工照明变成现实, 同时也促进了光度计量的发展。1909 年英国、法国和美国的有关研究机构, 为了统一和提高国际范围的发光强度, 协议采用炭丝白炽灯定义发光强度, 即

**由戊烷灯导出并用一组 45 个炭丝白炽灯所组成的平均发光强度, 并称之为“国际烛光”。**

炭丝白炽灯的稳定性较好, 但复现性较差, 几乎无法制出两个发光强度一样的白炽灯, 因此这个基准不完全令人满意, 只能是暂时性的。

## 二、发光强度的新定义——坎德拉

1908 年, Waiolner 和 Burgess 提出用浸没在盛有凝固铂的槽中的黑体作为发光强度标

准。1933年,黑体的性质提供一个从理论上解决发光强度的方法,采用这个原理,新的光度单位将建立在铂凝固点温度时的黑体的光辐射上。于是,1937年,国际照明委员会(CIE)和国际计量委员会决定从1940年起使用“新烛光”为发光强度单位,并定义如下:

**全辐射体在铂凝固温度下的亮度为 60 新烛光每平方米。**

也就是说在铂凝固点(2042.15K)上,绝对黑体的 $1\text{cm}^2$ 面积的 $1/60$ 部分的发光强度为1烛光。由于第二次世界大战的耽搁,这一标准没有执行。

1946年,国际计量委员会根据1933年第8届国际计量大会授予的权力,决定颁布:

**1 旧烛光 = 1.005 新烛光。**

1948年,第9届国际计量大会通过用拉丁文——candela(坎德拉)取代新烛光,坎德拉意为“用兽油制作的蜡烛”。

1967年,第13届国际计量大会考虑到这个定义的措辞还欠严密,决定将坎德拉定义为:

**坎德拉是在 101325 牛顿每平方米压力下,处于铂凝固温度的黑体的  $1/600000\text{m}^2$  表面在垂直方向上的光强度。**

1971年,第14届国际计量大会,通过了压力的单位牛顿每平方米的专门名称“帕斯卡”,符号为Pa。这样,坎德拉的定义改为:

**坎德拉是在 101325Pa 压力下,处于铂凝固温度的黑体的  $1/600000\text{m}^2$  表面在垂直方向上的光强度。**

这个定义有两个名词需要解释一下:

1. 铂的凝固点:我们在常识上可以理解的固体熔化就为液体,而后又形成蒸气,在这个过程中,虽然它们共存时的温度是固定的,但它们却不能固定在任何一个状态上,在给定固体加热的过程中,其温度逐渐上升,在刚一熔化时温度是固定的,固体完全熔化后又开始升温,在它们的交接处就是凝固点。

2. 黑体:黑体是一种假想的能量辐射源,在评价其他辐射源时,用它作为比较光源和参考光源,它是一种其辐射仅依赖于温度的辐射

体。这样的一种物体,它能够在任何温度下将辐射到它表面上的任何波长的能量全部吸收。换言之,在辐射体的任何温度下,绝对黑体光谱吸收率都等于1。

例如,如果给完全封闭的房间打上小孔射入光,光就不断地反射到墙壁上,然而都不能返回到原来的孔中,而全部辐射到里面了。如果将炽化的金属块放入空洞里,就是辐照内部,光也不会反射到外面。若将这个金属块换为在凝固点的铂放入空洞,它又辐射又不辐射,则可将这种空洞定义为黑体。具有很小的窥视孔的空洞大体接近于黑体。

实际上,根据物理学的表现形式,完全的发光体也就是完全的黑体。

按照这个发光强度定义,世界许多国家都建立了坎德拉的黑体辐射基准,并进行了国际比对。

### 三、坎德拉的最新定义

70年代,几个国家实验室利用黑体辐射基准复现的坎德拉,其数据差异较大,从几次国际比对的结果来看,相差约为 $\pm 1\%$ 。这表明各国在复现坎德拉时,可能还存在着尚未发现的某种系统误差,从而也暴露了上述坎德拉定义存在的问题。于是,人们重新开始考虑坎德拉的定义。与此同时,辐射计量技术迅速发展,有些国家已经利用它复现了坎德拉,并达到同样的准确度。1975年,W. R. Blevin等人提出重新定义坎德拉,得到了国际计量委员会和辐射度咨询委员会(CCPR)的支持,并鼓励有条件的国家用实验方法测量 $K_m$ 值(明视觉最大光谱光视效能,其值为 $683\text{lm/W}$ )。到1977年为止,已有10个国家(包括中国)的计量研究部门将自己的测量值通知该委员会,大多数国家的测量值接近 $683\text{lm/W}$ ,从理论计算的 $K_m$ 值恰好也为此数。于是,CCPR决定采纳 $683\text{lm/W}$ 作为 $K_m$ 值,这样可以保持光度单位的延续性。于是,1979年10月8日在巴黎召开的第16届国际计量大会上废除了国际计量委员会

根据 1933 年第 8 届国际计量大会授权,于 1946 年决定并经 1948 年第 9 届国际计量大会批准和第 13 届国际计量大会修订的坎德拉定义。同时,通过了一项关于重新定义坎德拉的重要决定。新定义为:

**坎德拉是一光源在给定方向上的发光强度,该光源发出频率为  $540 \times 10^{12}$  赫兹的单色辐射,而且在此方向上的辐射强度为 1/683 瓦特每球面度。**

定义中的  $540 \times 10^{12}$  赫兹辐射波长约为 555nm,它是人眼感觉最灵敏的波长。

这个定义的优点是容易复现,因发光强度与辐射量之间的关系按定义固定不变,而光强度单位与其他功率单位(如瓦特),采用简单的关系就能研制出各种实验方法,并能较好地控制实验的准确度。

#### 四、坎德拉的复现

目前,各国复现坎德拉的主要方法有两种:一是电校准辐射计法,二是光谱辐射法。前者复现准确度高,后者则由于分光后信号很弱,不易测准,故误差较大。下面简单介绍一下电校准辐射计法复现坎德拉的原理及其主要实验装置。

##### 1. 坎德拉的复现原理

由光度学基本原理可知,光源在固定距离下的光照度  $E_v$  与相应的光谱辐照度  $E_{e,\lambda}$  的关系为

$$E_v = K_m \int E_{e,\lambda} V(\lambda) d\lambda,$$

式中  $K_m$  为明视觉最大光谱效能,  $V(\lambda)$  为 CIE 标准光度观察的光谱效率。

当放入  $V(\lambda)$  滤光器时,在限制光阑处得到的辐照度由下式计算:

$$E_e = \left( \frac{l}{l - \Delta} \right)^2 \tau_{555} \int E_{e,\lambda} \tau(\lambda) d\lambda,$$

式中  $\tau_{555}$  为滤光器在 555nm 处的透射比,  $\tau(\lambda)$  为相对光谱透射比,  $l$  为光源到限制光阑的距离,  $\Delta$  为光线通过滤光器后的光程修正。

由上面两个公式可以看出,不放滤光器时辐射计限制光阑处的光照度为

$$E_v = E_e K_m \frac{1}{\tau_{555}} \left( \frac{l - \Delta}{l} \right)^2 \left[ \frac{\int E_{e,\lambda} V(\lambda) d\lambda}{\int E_{e,\lambda} \tau(\lambda) d\lambda} \right],$$

式中  $E_{e,\lambda}$  为光源的相对光谱功率分布。因为在两个积分中,有绝对光谱辐照度  $E_{e,\lambda}$  共同的因子,所以不需要对它进行计算,而用相对光谱功率分布  $E_{e,\lambda}$  所代替。

$E_v$  求得后,根据距离平方反比定律,即可算出光源的发光强度  $I_v$ :

$$I_v = l^2 E_v.$$

这就是复现发光强度坎德拉主要原理。

##### 2. 复现坎德拉的实验装置

装置如图 1 所示,它放在 6m 长的光轨上,辐射计置于一个特制的滑车支架上,其位置可精密调整。下面把实验装置中主要部分介绍如下:锥腔型辐射计 3 是测量辐射功率的基准,将它置于热屏蔽箱内,使锥型辐射计避免环境温度变化而产生热电势的漂移。在本实验中,用它测量标准灯在辐射计的限制光阑表面上所产生的辐照度。  $V(\lambda)$  滤光器 4 是由四片有色玻璃组成,用以修正辐射计光谱灵敏度,使其与明视觉光谱光视效率  $V(\lambda)$  相接近。挡屏 7 是用以阻挡杂散辐射进入辐射计内。

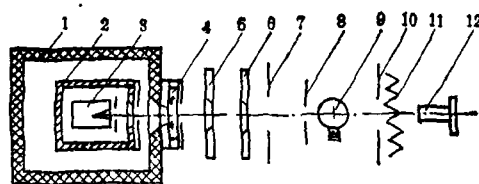


图 1 复现光强度单位实验装置示意图

1.热屏蔽箱;2.金属热屏蔽箱;3.锥腔型辐射计;4. $V(\lambda)$  滤光器;5,6.通水快门光阑;7.方孔大挡屏;8.灯前方孔挡屏;9.发光强度标准灯;10.方孔挡屏;11.辐射计;12.准直仪

将灯丝平面,通水快门光阑 5,6,滤光器 4,辐射计的限制光阑的中心精确调整在同一测量轴线上,且让灯丝平面和限制光阑垂直于该轴线,辐射计在热屏蔽箱内放置 10h 左右,待其温度分布均匀后,即可开始测量。

## 物理学与新型(功能)材料专题系列介绍 (II)

### 精细复合功能材料

姚 熹 张 良 莹

(西安交通大学电子材料与器件研究所,西安 710049)

本文介绍了精细复合功能材料的发展概况和复合材料结构参数(如复合度、联结型、对称性、周期性和标度)的基本概念,讨论了这些结构参数对材料性能的影响;简要地叙述了精细复合功能材料的制备技术,指出了制备技术方面的难点和探索研究的方向;最后扼要地介绍了精细复合功能材料在电子技术中的应用,指出精细复合功能材料可能是一种有价值的光电子材料。

The recent state of development of functional fine composite materials is described. The basic concepts of the structural parameters, such as compositivity, connectivity, symmetry, periodicity and scale, as well as their influence on the material properties are discussed. The processing technology difficulties encountered and future possibilities are briefly discussed. The applications of fine composite materials in electronics are described with emphasis on their possible importance in optoelectronics.

#### 3. 坎德拉的不确定度

我国于 1977 年建立了铂凝固点黑体光度基准,其复现发光强度坎德拉的不确定度为  $\pm 0.33\%$ 。1982 年用电校准辐射计按新定义复现坎德拉总的不确定度为  $\pm 0.28\%$ 。

在光学计量中,光度计量是最基本的部分。光度学最初被定义为是测量光源发光强弱的科学,而光源的发光强弱是要用人的眼睛来评价的;照明效果如何也得用人的视觉效果去衡量。因此,当要对一个用于照明的光源进行定量评价时,所涉及的量不是一个纯粹的物理量,而是一个与人眼视觉生理有关,同时与人的整个知觉系统的心理状态有关的量,称之为心理生理物理量。因此,光度单位“坎德拉”成为国际单位制中七个基本单位之一,因为它不能从其他单位直接导出。

其次,在七个基本单位中,坎德拉的复现准确度比其他一些基本单位要差得很多,尽管对铂的纯度作了规定,并推荐一些实现具体的黑

体辐射器的结构参数,但准确度仍很难达到 0.1%。这是因为影响准确度的因素很多,至今仍难于进行全面控制。

最后,在光度学基本单位的定义上也有不同的观点。国际照明委员会一贯坚持用流明作为光度学的基本单位。而国际计量局希望仍然维持坎德拉的现行地位,认为:坎德拉是七个基本物理单位之一,已经使用 30 多年了,如果目前就将它更换了,则可能给人们造成“基本物理单位也不稳定”的印象,这样势必影响国际单位制的推行。但不少人认为,兼有科学性、实用性优点的流明迟早会取代坎德拉的地位,作为光度学的基本单位。

- [1] 鲁绍曾主编,现代计量学概论,中国计量出版社,(1987)。
- [2] 王立吉编著,计量学基础,中国计量出版社,(1988)。
- [3] 高执中等,计量学报,4(1983),81。
- [4] 国际计量局,国际单位制(SI),第五版,中国计量出版社,(1988)。
- [5] W. Wright et al., *Appl. Optics*, 8(1969), 2449。
- [6] C. L. Sanders and O. C. Jones, *J. Opt. Soc. Am.*, 52(1962), 731。