

关于国际光度单位的新定义

禹秉熙

1979年10月8日至12日在巴黎召开了第十六届国际计量大会*。根据光度和辐射度咨询委员会(CCPR)的建议,重新定义了国际单位制(SI)的光度基本单位。用指定频率的单色辐射的光量和辐射量之间的关系定义光度单位来取代用铂凝固温度下黑体的普朗克辐射定义的光度基本单位。这一重大改变,是适应现代光度学和辐射度学的发展而采取的。

一、光度学的发展

光引起人眼视网膜的视觉效果,人的感官能够感知它,所以人类对光的认识有漫长的历史。定量评价照明光源的光度学早在十八世纪就成为计量学的一个分支,先后用蜡烛,火焰光源,碳丝灯,最后是铂凝固温度全辐射体做发光强度单位。

光度学中早期发展的是目视光度学,它在对光的电磁辐射本质还没有认识的时代就已经有了的。虽然以后的目视光度学常常依靠辐射度学的测量方法有所修正和提高精度。但基本上是与辐射度学没有联系而独立的。由于不同人的眼睛的视觉特性有很大差异,不同观测者所观测的结果很难达到一致,所以必须规定标准视觉观测者,并研究选择标准观测者的方法。为获得目视测量最好精度还要规定最适宜的视场,照度、环境照度、光源分布温度、色差等。但无论用任何方法选择标准观测者都不能达到欲想的准确度,虽然有繁复的规定,目测结果不能以足够的准确度复现。目视光度法受观测者主观条件影响,精度总是不高。

自从1913年国际照明委员会(CIE)成立以来它的重点已从1930年以前的目视光度学转为现代的物理光度学。可见光波段以外的红外和紫外辐射的发现及十九世纪后半叶到本世纪初对辐射本质的认识,为物理光度学奠定了基础。认识到光是电磁辐射,物理光度学和辐射度学就联系起来。

国际照明委员会根据很多个具有正常视觉的观测者的平均光谱灵敏度规定了标准明视觉光效函数(视见函数) $V(\lambda)$ 和标准暗视觉光效函数 $V'(\lambda)$ 。

明视觉光效函数 $V(\lambda)$:

当测定在阈阅级(threshold levels)以上的不同波长的辐射对正常人眼凹区视觉所产生的相对光效应时,采用国际照明委员会明视觉光效函数 $V(\lambda) = \overline{y}(\lambda)$ 。单色辐射波长 λ 的光谱光效率 $V(\lambda)$ 是在特定的光度条件下,产生同样强度的光感觉的波长 λ_m 时的辐射通量同波长 λ 时辐射通量的比,而 λ_m 值的选得使在该波长下这个比值的最大值等于1。这些值在360毫微米—830毫微米范围每隔1毫微米给出,它们是从1924年给出^[1]的由400—700毫微米每隔10毫微米的 $V(\lambda)$ 值和1931年给出的从380—780毫微米每隔5毫微米的 $V(\lambda)$ 值,经内

* 国际计量大会,国际计量局,以前曾译国际权度大会、国际权度局。

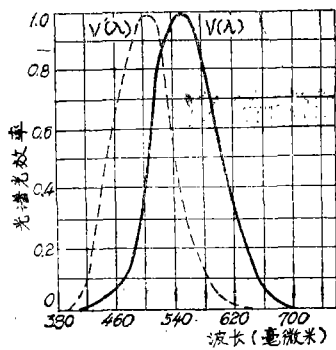


图1 明视觉和暗视觉光效函数

微米以下波长，与标准有很大差异。对卅岁以上年纪的人的眼睛，光谱蓝端，数值趋于减少^[3]。

介于明视觉和暗视觉之间的光效函数(也可称介视觉光效函数)由于比较复杂未予规定。

国际照明委员会建议^[4]：在任何情况下，只要暗视觉被确信起一定作用，则应给出暗视觉和明视觉的两种光度值。有了这个规定，光度学的基本原理为

$$X_v = K_m \int_{360}^{630} X_{e,\lambda} V(\lambda) d\lambda \quad (1)$$

式中 X_v 为光度量， $X_{e,\lambda}$ 为辐射度量， $V(\lambda)$ 为明视觉光效函数。例如光通量 ϕ_v 为

$$\phi_v = K_m \int_{360}^{630} \phi_{e,\lambda} V(\lambda) d\lambda \quad (2)$$

式中 $\phi_{e,\lambda}$ 为光谱辐射通量。对其他光度量也以此类推。

对暗视觉只要用 $V'(\lambda)$ 代替 $V(\lambda)$ ，用 K'_m 代替 K_m 就可仍然用上述方程。

根据这个光度学基本原理，物理光度学中先发展了模拟法。用配以滤光器或借助色散系统和合适的遮光板，使接收器修正为具有 $V(\lambda)$ 光谱灵敏度，做物理标准眼睛进行光度学测量。但是，由于制作光谱灵敏度与 $V(\lambda)$ 准确一致的接收器甚为困难，必须测量光谱能量分布来进行修正，即使精确度比目视法好得多，还不能过高的估计它的准确度。所以，准确测量光谱辐射能量分布，通过运算获得光度量的光谱测量方法必然逐渐代替对复合辐射的物理光度学模拟法。

光度量是一个与人眼视觉生理有关的心理物理量，不能从国际单位制的纯粹物理量单位：米、千克、秒、安培等导出。1929年，国际计量委员会决定将其权限扩大到光度基准方面。1948年，国际计量大会确定^[5]了铂凝固温度全辐射体作为光度基准，把坎德拉作为发光强度单位，并做为国际单位制的基本单位之一。

现代科学技术及其各应用领域所用的光源不仅涉及光度量，而且越来越多的涉及更宽光谱范围的辐射度和光谱成分。在底片的感光效应，植物的光合作用或生物效应中需要考虑的加权函数同视觉光效函数 $V(\lambda)$ 也大不相同。解决这类问题，传统的光度学已无能为力，只有光谱辐射测量方法才能解决它。若能把辐射度和光度的单位制紧密地连系起来，就可以实现这两个单位之间的精确换算。从(1)式，可知，只要确定了辐射度单位和光度单位之间的换算因子 K_m 值，用光谱辐射测量法测定辐射度量 $X_{e,\lambda}$ 值，光度量值 X_v 也就完全被确定。光度学同辐射度学紧紧连在一起，而且是辐射度学的一部分，象光在辐射波长中

的地位一样。因此，从六十年代开始光谱辐射测量技术有了迅速的发展，而原来基于目视光度学和模拟法物理光度学建立的铂凝固温度全辐射体光度基准，也就不能适应现代光度学和辐射度学的发展了。

二、铂凝固温度全辐射体光度基准

经过多次讨论，1948年，第九届国际计量大会接收铂凝固温度全辐射体作为光度基准，坎德拉作为发光强度的单位。按1967年通过的修正定义^[6]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平方米表面在垂直方向上的发光强度。

我国以铂凝固点全辐射体复现光度基准的研究工作先是在长春光机所同中国计量科学研究所的同志一起进行，后来由计量科学研究所完成，于1974年通过了国家鉴定^[7]，正式确定为我国光度基准，2042K色温付基准灯组的精度为： $\pm 0.35\%$ ，2859K工作基准的精度为： $\pm 0.59\%$ 。

通过实现铂凝固温度下的黑体来准确地确定坎德拉的量值在实验上非常困难。从1949年到1969年由建立了光度基准的八个国家计量机构进行的国际比对结果表明^[8]：各国的光度付基准的不一致性大到 $\pm 0.8\%$ ，并发现黑体复现及把它传递到白炽灯上存在系统误差，虽然进行了这方面的研究，但没有减少差别。这样把它传递到高分布温度的光度标准的误差就更大。铂凝固温度全辐射体作为光度基本单位坎德拉是由复合辐射定义的，而不是单色辐射，由于不能准确的确定铂凝固温度（它目前还是没有指望的），不能准确知道这种复合辐射的光谱功率分布。定义中光强单位坎德拉和光通量单位流明同辐射通量（辐射功率）单位瓦特之间数值关系也不明确。严格地说，铂凝固点黑体本身是光亮度基准，不是光通量基准，在光度学各量中最基本的量是光通量，光强度是由它导出的量，但单位系统中却恰恰相反光强单位是基本的，反而光通量是由它导出的单位，这就很难使人理解。另外，由于基准器实验的困难，一些国家一十年内也很难重新复现一次，光度基准的精度自1948年建立起来的卅多年一直没有改善，在同一时期，国际单位制（SI）的其他基本单位，如例：时间单位秒、长度单位米、电流强度单位安培等基准的精度提高了几个数量级。

因此，多年来有些人一直提出重新定义光度学基本单位的建议。

三、光度基本单位的新定义

首先提出以辐射度的方法保持测光单位的是英国NPL的J. S. Preston，他在1963，1964的工作^[9]引起了广泛的注意。此后澳大利亚NML于1971年直接用绝对辐射计测定了最大光谱效率 K_m 值，并建立了自己国家的光度单位^[10]。

1974年澳大利亚NML的W. R. Blevin和美国NBS的B. Steiner共同向国际计量委员会光度和辐射度咨询委员会建议^[11]：1) 光度基本单位应重新定义为与指定频率的单色

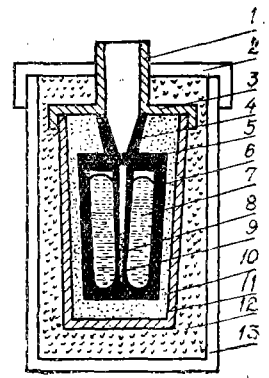


图 2 光度基准原器

- 1—圆柱形管 2—石英坩埚盖
3—氧化铝坩埚盖 4—喇叭口
5—氧化钡坩埚盖 6—氧化钡坩埚
7—铂 8—观察管 9—氧化钡粉 10—熔融氧化钡粉 11—氧化铝坩埚 12—氧化钡粉 13—石英坩埚

辐射功率有确定的数值关系的单位，2) 以流明取代坎德拉作为测光基本单位。1975年9月在伦敦联合召开的国际照明委员会第十八次大会和光度辐射度咨询委员会第八次大会基本通过了该建议^[12]，并正式提请国际计量委员会讨论。

建议新定义的光度单位是建立在准确进行辐射度量的绝对测量基础上用其绝对值和相关联的数值导出光度量值。也就是将光谱辐射度量 $X_{\dots\lambda}$ 同国际规约化的光谱光效函数 $V(\lambda)$ 相乘并求积分，然后再乘上单位制换算常数 K_m 就得到光度量值。即 (1) 式

$$X_v = K_m \int X_{\dots\lambda} V(\lambda) d\lambda$$

$V(\lambda)$ 在波长555 毫微米为最大，取值为1来规一化。 K_m 就代表这个波长下光度量与辐射度量的比值，称为最大光谱光效率。根据铂凝固温度黑体辐射光度基准定义如果铂的凝固温度能够测准的话，用普朗克公式可以计算出 K_m 值

$$L_{\dots\lambda}(Pt) = \frac{c_1 \lambda^{-5}}{\pi} \left(e^{\frac{c_2}{\lambda T(Pt)}} - 1 \right)^{-1} \quad (3)$$

那么

$$L_v(Pt) = K_m \cdot \frac{c_1}{\pi} \int \lambda^{-5} \left(e^{\frac{c_2}{\lambda T(Pt)}} - 1 \right)^{-1} V(\lambda) d\lambda \quad (4)$$

$$K_m = L_v(Pt) \left\{ \frac{c_1}{\pi} \int \frac{\lambda^{-5} V(\lambda) d\lambda}{e^{\frac{c_2}{\lambda T(Pt)}} - 1} \right\}^{-1} \quad (5)$$

式中， c_1, c_2 为已知常数， $L_v(Pt) = 6 \times 10^5$ 坎德拉/米²单位立体角。

如前所述铂的凝固温度测不准，所以 K_m 值的计算值也就不确定了。

到目前为止铂凝固温度值 (Pt) 及其对应的 K_m 的计算值列出如下：

$$Pt = 2045K \quad (1968\text{年国际实用温标})$$

$$K_m = 671 \text{ 流明/瓦}$$

$$Pt = 2041K \quad (1972\text{年NPL测得的值})$$

$$K_m = 687 \text{ 流明/瓦}$$

$$Pt = 2043K \quad (1974\text{年澳NML测得值})$$

$$K_m = 680 \text{ 流明/瓦}$$

$$Pt = 2041.8K \quad (1975\text{年西德PTB测得值})$$

$$K_m = 683.5 \text{ 流明/瓦}$$

从1963年开始一些国家的计量研究机构进行了实验确定最大光谱光效率 K_m 的研究。用

绝对辐射计 (其光谱灵敏度对各波长都是相同的) 前面放光谱透过率比例于 $V(\lambda)$ 的滤光器进行。如图3所示。

假设在绝对辐射计的接受面开放了一个光谱透过率为 $\tau_m V(\lambda)$ 的滤光器，这里 τ_m 是滤光器对 $\lambda_m = 555$ 毫微米波长的光谱透过率， $V(\lambda)$

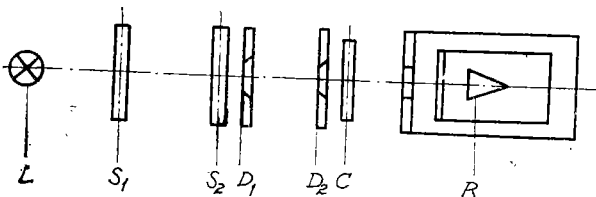


图3 K_m 值测量装置示意图

L: 光源, $S_1 S_2$: 通水挡屏, D_1, D_2 : 光栏

C: $V(\lambda)$ 滤光器, R: 辐射计

是标准光效函数。

当它接收一个光强标准灯的辐射时，其响应为

$$R = \tau_m \int_{360\text{ nm}}^{680\text{ nm}} E_{e,\lambda} V(\lambda) d\lambda \quad (6)$$

$E_{e,\lambda}$ 是该光强标准灯在接受面的光谱辐射照度。

而当移去滤光器时在同一表面的照度 E_v 为

$$E_v = K_m \int E_{e,\lambda} V(\lambda) d\lambda \quad (7)$$

该标准灯的光强值为 I_v ，灯丝到接收面的距离为 d

$$\text{那么 } E_v = \frac{I_v}{d^2} \quad (8)$$

由这些方程可得：

$$K_m = \tau_m \frac{E_v}{R} = \tau_m \frac{I_v}{R \cdot d^2} \quad (9)$$

I_v 是光度基准给出的， $\tau_m \cdot d$ 也容易测定，配制好滤光器 $\tau_m V(\lambda)$ ，有了绝对分度标定的对波长中性的辐射计就可以求出 K_m 值。

实际上我们不可能配制完全比例于 $V(\lambda)$ 的滤光器，只是近似一致的 $V'(\lambda)$ ，因此必须进行修正。

光度学和辐射度学咨询委员会 1975 年第八次大会建议各国在 1977 年 CCPR 会议之前将他们认为最合适的 K_m 值推荐给 CCPR。

各国提出的 K_m 值为：

NML	(澳大利亚)	682 686	流明/瓦
PTB	(西 德)	683.6	流明/瓦
NPL	(英 国)	686 682	流明/瓦
NBS	(美 国)	684	流明/瓦
ETL	(日 本)	683	流明/瓦
NRC	(加 拿 大)	682	流明/瓦
NPRL	(南 非)	681	流明/瓦
ASMW	(东 德)	683	流明/瓦
NIM*	(中 国)	684	流明/瓦

1977 年 CCPR 第九次大会根据上述测量值决定采用 $K_m = 683$ 流明/瓦。这样即使现行铂凝固温度黑体光度基准被废止，也保持了单位值大小的连续性。

CCPR 第八次大会考虑到光谱光效函数 $V(\lambda)$ 在空气中对波长为 555 毫微米的辐射有最大值，而频率是比波长更基本的量，所以建议在光度基本单位的新定义中使用频率为 $540.0154 \times 10^{12} \text{ Hz}$ （它是标准空气折射率为 1.00028 中 555 毫微米波长）的单色辐射。

实际上，频率为 540×10^{12} 的光在标准空气中的波长为 555.016 毫微米，而这一波长的光谱光效率同 555 毫微米波长的最大光谱效率 $K_m = 683$ 流明/瓦非常接近，我们为了方便，取频率为 $540 \times 10^{12} \text{ Hz}$ 的单色光为最大光谱光效率 $K_m = 683$ 流明/瓦，这样也毫无影响其精度。

* National Institute of Metrology (Beijing)

中国计量科学研究院（北京），工作是计量科学研究院分院做的。

暗视觉的最大光谱光效率为 $K'_{\text{m}} = 1700$ 流明/瓦。

CCPR 认为光度学各量中光通量是最基本的量，光度单位的新定义应以光通量的单位流明取代光强单位坎德拉作为国际单位制的基本单位。但是，单位咨询委员会 (CCV) 却认为：现在正在全世界推广国际单位制 (SI)，改变国际单位制的基本单位这可能降低它的威信，影响推广，应该暂时还用光强单位坎德拉为基本单位。

根据 CCPR 1977 年第九次会议关于重新定义坎德拉的建议，1979 年 10 月第十六届国际计量大会决定采纳如下新的光度单位定义。

光度单位坎德拉是“发射频率 540×10^{12} Hz 的单色辐射光源，在某一方向的辐射强度为 $1/683$ 瓦/球面度时的光（强）度。

虽然还未能把光度单位从坎德拉改为流明，但是把辐射通量与光通量用确定的数值连系起来了。

光度量是含有生物学效应系数的量，单位咨询委员会 (CCV) 在审议重新定义坎德拉的过程中讨论的一个重要议题是如何处理光度量，红斑效应，杀菌效应等含有生物效应系数的量的问题。根据单位咨询委员会的请求：当时国际计量局局长 J·泰里昂在“关于含有生物学效应系数的量的定义与单位”的报告中指出：国际单位制 (SI) 在全世界能够推广是由于它简单 (Simplicity)，对生物学效应的量上给各种特有的基本单位就有损于 SI 的简单性 (Simplicity)，SI 是物理量。从上述三点出发的话坎德拉不能做为基本单位，这些量的单位应该用相应的物理量的单位来定义。那么光通量的单位应该用瓦特。但是鉴于光度量已经长期使用，暂时做为例外不适用上述建议，仍然定义基本单位，除此之外的生物学效应量要尽量用瓦特或其他物理量的单位表示。视觉光效函数 $V(\lambda)$ 是无量纲的，最大光谱光效率值 K_{m} ，是物理量单位与生物物理量的换算值流明/瓦。

现在被 CIE 采用的标准明视觉光效函数 $V(\lambda)$ 是 Gibson 和 Tyndall (阶梯法)，Coblentz 和 Emerson (闪烁法) 等人测定结果的平均值。五十年来，人们不断对 CIE 的 $V(\lambda)$ 函数的有效性提出异议。即使将来根据新的研究结果重新确定了 $V(\lambda)$ 值，也不需要改变光度基本单位的基准，因为它是对单色辐射定义的， K_{m} 值不变只是 $V(\lambda)$ 函数值变了，光度量的量值大小有变化，光度基本单位不改变。这也是光度基本单位新定义的优点。

本文的全部原稿由冯家璋同志审阅并做了修改，周雅琴、崔敦杰同志给予了不少热情帮助，作者在这里深表感谢。

参 考 文 献

- [1] C. I. E Compte Rendu 1924, 67.
- [2] Ibid., Table II, 1931, 25.
- [3] C. I. E Compte Rendu, Recommendation I 1951, 62.
- [4] Ibid., Recommendation, Committee 1. 4. 1, 1955.
- [5] Conference Generale des Poids et Mesures, 9th, Compte Rendu, 1948, 54.
- [6] Conference Generale des Poids et Mesures, 13th, Compte Rendu 1964, 104.
- [7] 中国计量科学院光度基准研究组, 计量学报 1980, 1, No. 4, 226.
- [8] BIPM, 1875—1975, 1976.
- [9] J. S. Preston, Proc. Roy. Soc. A 278 1964, 137.
- [10] W. J. Brown, Metrologin, 1975, 11, No. 3, 111.
- [11] 胜山元, 蒲地久吉, Metrologin 1975, 11, No. 4, 165.
- [12] Metrologin 1976, 12, No. 1, 85.