

米(长度单位)定义的现况和发展趋势

赵克功

(中国计量科学研究院)

一、米原器和米定义的现况

1. 米原器

从1889年到1960年作为物理学中的长度单位——米，一直是利用一根铂铱合金尺上两端部刻线间的距离来定义的。定义规定了固定的铂铱合金成份，冶炼方法，加工制造工艺，尺子的造型和使用条件……等^[1]。这是一个以实物作为计量的基准，计量学家称它为原器。米原器就是指在法国巴黎国际计量局保存的，按定义规定条件制成的∩-C形的铂铱米尺。由于刻划工艺，比较测量误差等原因，米原器的不确定度在 10^{-7} 量级。这样一件实物基准必然有以下不可克服的缺点：(1)原器的准确度受材料老化和机械变形影响，(2)原器只能安放在一个指定的地点，且有丢失和损坏的危险。

2. 米定义的现况

1960年国际计量大会废除了统治达七十多年的铂铱合金米尺——米原器作为长度基准，建立了新型米定义，定义规定^[2]：

米的长度等于⁸⁶氩原子的 $2p_{10}$ 和 $5d_5$ 能级之间跃迁的辐射在真空中的波长的 1650763.73 倍。这是一条橙黄色谱线，其波长值为

$$\lambda_{\text{真}} = 0.60578021 \text{ 微米。}$$

米定义的变更，原因比较多，其中主要是量子物理学的进展为之奠定了理论基础，科学技术的发展提供了变更的技术条件和提出变更的要求。在原子物理学、光谱学的基础上，使人们对物质结构有了新认识：原子两固定能级间的能量差是一个常数，那么，它辐射的频率 $\nu =$

$$\frac{\Delta E}{h}, \text{ 而 } \lambda = \frac{c}{\nu} \text{ (} c \text{ 为光速)。因此，现行米定义}$$

以波长为基准是自然基准，利用自然基准取代实物基准，这是所有物理量计量基准发展的趋势。

物理学已证实，计量学家在复现米定义时也发现，原子谱线有各种位移。为了提高米的准确度，对作为长度基准⁸⁶氩 $5d_5-2p_{10}$ 的辐射规定了如下条件：⁸⁶氩波长基准灯采用西德联邦物理研究院(PTB)力学处的恩尔哈得(Engelhard)型，是热阴极直流放电，为了保证氩的蒸气压强，减小谱线的多普勒位移，将灯浸入氮三相点 63 K 的低温容器中，这时谱线半宽度为 400 兆赫，相干长度为 80 厘米。最终气压和电流密度引起的谱线位移与多普勒位移符号相反，大小相等而相互抵消。为了克服同位素效应，恩尔哈得研究了⁸⁶氩同位素的分离方法，其同位素纯度可达 99.999% 。除上述规定外，1960年米定义咨询委员会还规定：毛细管的放电电流密度为 0.3 安培/厘米²，准许误差为 $\pm 1\text{ K}$ 和 ± 0.1 安培/厘米²。满足上述规定的⁸⁶氩原子能级间 $5d_5-2p_{10}$ 辐射真空波长的准确度可达到 $1 \times 10^{-8}\lambda$ 。1962年以后，又对 $5d_5-2p_{10}$ 的谱线不对称性进行研究测试。如果能分辨谱线轮廓的极大值和重心值，准确度就可达到 $\pm 4 \times 10^{-9}$ 。这是现行长度基准的最高准确度^[3]。

二、稳定激光作为长度工作标准

1960年国际计量大会通过⁸⁶氩辐射的真空波长作为长度基准重新定义米的时候，发现了激光。激光的机理确定了激光辐射的谱线性能

比最优秀的光谱灯——⁸⁶氪的谱线性能优越。表 1 给出了两种谱线性能的对比。

表 1 ⁸⁶氪与激光谱线性能的对比

	⁸⁶ 氪	激光
谱线半宽度(兆赫)	400	2×10^{-9} (0.2 $\times 10^{-6}$)
相干长度(厘米)	80	10^{10}
光谱(毫瓦)	0.1×10^{-3}	0.2*
复现性	$\pm 1 \times 10^{-8}$ (4×10^{-9})	$\pm 4 \times 10^{-11}$ **

* 指小型单纵模氦氖激光器。

** 国际计量大会 1975 年通过值的复现性。

激光(单频)光束的频率 $\nu = q \frac{c}{2nL}$ (q 为正整数, c 为光速, n 为腔内折射系数, L 为腔长) 与谐振腔长度有关, 作为量值单位的基准, 激光谐振腔的长度必须是稳定的。但激光与⁸⁶氪的辐射都同样为电磁波, 同是基于原子两个能级间固定频率(波长)的辐射, 原则上可作如下的计算:

$$\lambda = C_2 \alpha^{-2} \left(\frac{\hbar}{mc} \right),$$

其中 C_2 是常数, α 是精细结构常数, $\alpha = \frac{e^2}{\hbar c} \approx 1/137$, m 是电子质量。因此, 可以利用高稳定激光辐射的准确的波长值代替⁸⁶氪作为新型长度副基准。

1962 年, 米定义咨询委员会号召有能力的国家计量部门研究利用激光取代现行长度基准。此后, 激光频率稳定性与复现性已取得了很大进展。稳频方法很多, 大体可以分为两类。一类是用激光输出功率曲线进行稳频, 其中最常见的是将激光稳定在输出功率曲线的兰姆凹陷的中心。这种方法装置简单, 稳定性可达 10^{-9} , 但复现性差, 仅为 10^{-8} 量级^[4]。另一类是利用外界参考谱线作为频率标准对激光进行稳频, 例如采用内(或外)吸收室^[5,6] 作为外界参考频率标准, 此类装置较复杂, 但取得的频率稳定性与复现性很高。目前甲烷饱和吸收稳定的 3.39 微米氦氖激光器输出频率的稳定性和复现性已优于 10^{-11} 量级^[5]。

鉴于激光稳频技术的发展, 碘和甲烷饱和吸收稳定的氦氖激光器的稳定性和复现性早已

超过现行长度基准, 所以 1973 年国际米定义咨询委员会建议利用上述两种稳定激光器的波长值($\text{CH}_4, \nu_3, p(7), F_2^{(2)}, \lambda_{\text{真空}} = 3392231.40 \times 10^{-12}$ 米; $^{127}\text{I}_2, 11-5$ 带, $R(127), i, \lambda_{\text{真空}} = 632991.399 \times 10^{-12}$ 米) 作为长度副基准¹⁾, 并指出, 利用这些辐射代替⁸⁶氪基准作为工作基准, 在波长比对中, 准确度高于 4×10^{-9} , 在⁸⁶氪辐射的波长不能达到的精确度范围内, 以激光波长作为统一的依据。米定义咨询委员会给出了甲烷饱和吸收稳定的氦氖激光器的频率值为

$$88376181627 \pm 5.0 \text{ 千赫。}$$

鉴于电磁波的波长与频率的关系为 $\lambda \cdot \nu = c$, 可得真空中光速值 $c = 299792458$ 米/秒。光速值的不确定度为 $\pm 4 \times 10^{-9}$, 这是由现行长度基准⁸⁶氪引起的。上述建议在 1975 年国际计量大会上得到批准通过, 光速值也被国际计量大会和国际天文学联合会推荐使用。因此, 从 1973 年以后提高激光频率的稳定性、复现性和重新定义米是计量学的重要研究课题之一。

建立新型长度基准是科学技术发展的需要, 如自由落体的重力加速度的绝对测量和通过光的传播时间测量求得星球间的距离 l (如地球到月球的距离), 不确定度要求在 $\pm 10^{-10}l$ 。光的传播时间——光年是天文学家量度距离的“长度单位”。要换算为距离就必须利用光速值, 光速值是一个基本物理常数, 它在物理常数中占有十分重要的地位, 因此, 迫使利用光速值进行定义和作为国际单位制中一个基本单位。

波长 λ 和频率 ν 的关系式为 $\lambda \cdot \nu = c$, 需要指出这个电磁波是平面波, 光速是在真空中传播无相位干扰的相速。这种光波在真空中的相速符合物理理论的假设, 特别是相对论的假设。但光速没有色散, 或说 c 值与波长 λ 和频率 ν 无关, 迄今没有充分验证。

1) 1979 年 6 月在法国巴黎举行的米定义咨询委员会上又推荐碘稳定的 0.612 微米氦氖激光器和碘稳定的 0.515 微米氦离子激光器的波长作为长度测量参考波长(这次会议上建议不用“副基准”一词, 而称为参考波长或工作标准), 它们的波长值为

$^{127}\text{I}_2, 43-0, p(13), \lambda_{\text{真空}} = 514673.467 \times 10^{-12}$ 米;

$^{127}\text{I}_2, 9-2, R(47), \lambda_{\text{真空}} = 611970.771 \times 10^{-12}$ 米。

其不确定度为 $\pm 4 \times 10^{-9}$ 。

目前,国内外研究分子、原子饱和吸收、原子束、分子束、双光子与多光子吸收光学 Ramsey 效应等稳定激光频率的方法,利用这些方法使氦氖激光器、氩离子激光器、染料激光器、染料色心激光器、二氧化碳激光器以及二氧化碳泵浦的红外激光器的频率复现性都取得了良好的效果。在这方面中国计量科学研究院也取得了较好成绩。光频率测量由于接受器件的频率效应和测量系统的复杂技术影响了它的不确定度、测量稳定激光辐射的频率值,至今也仅在 10^{-10} — 10^{-11} 量级范围内,它与铯基准频率有较好的一致性。这是当前(1979年)利用一束电磁波的波长与频率统一时间频率与长度两个基本单位基准的第一个问题。第二是稳定激光辐射频率的频移如:二阶多普勒效应引起的频移,光子反冲效应,压力位移,光场产生的谐振频率位移,波前曲率引起谱线加宽,剩余地磁塞曼效应,饱和加宽,调制加宽等等的研究还在继续,实验和理论还不成熟。

如上所述,当前利用单色(或单频率)的平面电磁波的光速值统一长度与时间频率两个单位的基准还需进一步研究。长度与时间作为两个基本量单位基准还会共存一段时间,但两个基准的统一是发展趋势。如果只利用一台不确定度为 10^{-11} 量级的稳定激光器的波长值来定义米,这样的新型长度基准不能满足当前科学技术发展的要求,特别是天文学家、物理学家、地球物理学家、空间科学技术工作者的要求。这方面在1973年米定义咨询委员会已和天文学等几方面的科学家达成协议:(1)共同推荐 $c = 299792458$ 米/秒这一光速值,在改变米定义时,此值不要改变;(2)希望今后的光速值(在8以后的)尾数为零。

三、1979 年米定义咨询委员会 对米定义的建议

1979年6月在法国巴黎举行的米定义咨询委员会建议,目前的米定义(^{86}Kr 波长基准)已不能为所有的应用提供足够的精度,因此将更改这一定义。同意1975年第十五届国际计量大会推荐的真空光速值($c = 299792458$ 米/秒)不变是合适的。由于在真空中的波长、频率及光速之间的关系,在这三个量中选择两个作为基本量。目前的秒定义是非常准确的,其不确定度在不断地改进¹⁾,并且频率不依赖于几何参数,它比波长更容易精确地复现和测量。因此,有一个秒定义和一个固定的真空光速值将比一个秒定义和一个米定义更好。所以1979年国际米定义咨询委员会建议下述的新米定义:

“米的长度等于在真空中的平面电磁波在 $1/299792458$ 秒内所走过的距离。”这有待于1983年的国际计量大会通过。

参 考 文 献

- [1] Compt. Rend. I. Conf. Gén. Poids et Mes., (1890), s. 38.
Compt. Rend. VII. Conf. Gén. Poids et Mes., (1927), s. 49.
- [2] Compt. Rend. XI. Conf. Gén. Poids et Mes., (1960), s. 85. Gesetz über Einheiten im Messwesen Vom 2. Juli 1969. BGBl. Teil 1 (1969) Nr. 55, s. 709.
- [3] E. Engelhald und R. Vieweg, *Z. Angew. Phys.*, **13**(1961), s. 580.
- [4] 中国计量科学研究院激光组, *物理*, **2-1** (1973), 35.
- [5] 赵克功等, *科学通报*, **23-12** (1978), 734.
- [6] CCDM, 1979 Draft A statement.

1) 秒定义咨询委员会主席 Prof. Becker 与作者在1979年6月17日私人讨论中谈到,西德联邦物理研究院的铯钟不确定度已达 6.5×10^{-15} 。