

长度基本单位“米”的定义及其沿革

——纪念“米”定义公布 100 周年

王 桐

(中国计量科学研究院)

本文首先较详细地介绍了长度基本单位“米”产生的历史背景和经过,其次说明了“米”定义的几次变更原因和意义,最后简述了“米”定义的发展。

长度基本单位“米”是国际单位制(SI)中七个基本单位之一,也是物理学中最基本的长度量度单位。从其产生(1889)到现在已经整整一百年了。本文把它的定义及其演变的历史简述如下。

一、长度基本单位“米”产生的历史背景及其第一次定义

在 1790 年法国国民议会上,根据人们迫切要求制定全国统一计量的愿望,议会委托法国科学院开展建立有关长度、质量等量的基准研究工作。对于长度的基准单位的选择,当时有两种完全不同的建议。一种是用秒摆的长度,另一种是用子午线弧长的长度。第一种方法是法国天文学家 Mouton 和 Huyghens 分别于 1670 年和 1673 年提出的,后来 Talleyrand 于 1790 年又将这一建议正式向国民议会提出。但法国科学院拒绝接受这一建议,其理由是众所周知的,即秒摆的长度依赖于重力加速度,并因此随在地球上各地方不同而不同。法国科学院赞成另一提议,在其推荐下,国民代表大会于 1791 年采纳了只基于一个长度基本单位“米”的计量制度,即“米”被规定为等于地球子午线的四千万分之一,并选用了古希腊文“Metron”这个词,后来演变为“Mètre”。它含有量度和测量之意。1792 年,在法国天文学家 Delambre 和 Méchain 的领导下,开始了自北方的敦克尔

克至南方西班牙的巴塞罗那之间并通过巴黎的子午线弧长测量。直到 1799 年,历时七年完成了测量和计算工作,并制成米的标准范型或称为基准器。它是一支端度基准,用烧结铂制成,于 1799 年 6 月 22 日保存在巴黎共和国档案局里,因此也称为“档案局米”。

法国人开创了米制后,随之开始向世界普及,早在 1820 年,米制就为荷兰、比利时和卢森堡所采用,接着是西班牙、哥伦比亚、墨西哥、葡萄牙、意大利以及许多其它国家相继采用。1864 年,英国允许米制单位同英制单位并用,后来德国也采用了米制。

特别是在 1867 年的巴黎世界博览会上,人们发现从世界各地送来的大量展品,其量值都是用多种基准描述的,统一计量单位就成为当务之急了。于是,在展览会期间成立了一个“度量衡和货币委员会”,该委员会肯定了法国米制的优点及其经济意义,并建议普遍采用米制。该委员会曾两度召开会议,一次是 1870 年,另一次是 1872 年。特别是后一次会议共有 30 个国家派代表参加,会议主要决议是通过以法国档案局所保存的“档案局米”作为长度基本单位。为什么没有取理论米——地球子午线的四千万分之一呢?这是因为在完成通过巴黎的地球子午线弧长的测量以及米基准器制造工作之后,Fessel 用较好的仪器重新对地球子午线进行测量,发现所测得的地球子午线的四千万分之一比“档案局米”大约短 0.2 mm。于是,人们认为

即使现在用最先进的仪器测得的最好结果，也会被将来更精密仪器测得的更佳数值所取代。也就是说，通过实验测出的量总不能固定下来。其次，在以子午线弧长四千万分之一为单位的米基准器复制时，不如根据“档案局米”这样的物质基准器制造时能够较好地确定其尺寸大小以及可能达到的精度。正因为如此，该委员会作出了放弃米基准以地球子午线四千万分之一的依据，而把其定义为原器的刻线间的距离。

1875年3月1日，法国政府召集了“米制外交会议”，20个国家派出了政府代表与科学家出席。会议批准了国际米制委员会的建议，在1875年5月20日正式签署了“米制公约”，俄国、法国、德国、美国和意大利等17国代表在公约上签了字，公认米制为国际通用的计量单位，并决定成立国际计量委员会和国际计量局。

国际计量局经过几年的研制，最后用含90%的铂和10%的铱合金制成30根米原器。它是由Tresca设计和计算的，呈X型截面，其外接正方形的每边长200mm，中间抛光平面的两端部分别刻有相距0.5mm的三条线，线的粗细为6—8 μm ，顺着原器的轴线方向，在和上述三条线相垂直处刻有两条较粗的线，彼此相距0.2mm。当原器处于冰点温度时，一端中间的一根线与另一端中间的那根线之间的距离，再与“档案局米”比对，经过遴选，即No.6为国际米原器，也称“国际米”，它刻有哥德体字母“M”的标志。1889年第一届国际计量大会批准了由国际计量委员会所选择的米原器，并于同年9月26日宣布了“米”的第一次定义，即

“米的长度等于在冰融点温度时截面为X形铂铱合金尺两端刻线记号间的距离”¹⁾。

这个米原器自那时以来一直保存在法国巴黎附近的桑特-克鲁德公园的国际计量局里。国际米的一端见图1。

其余的米原器均仔细地与国际米原器进行了比对，测定了它们的膨胀系数，并在第一届国际计量大会期间分发给提出需要的国家。这些米尺就构成了一组相互一致的国家基准，并在每个国家以足够高的精度来确定相同的长度单

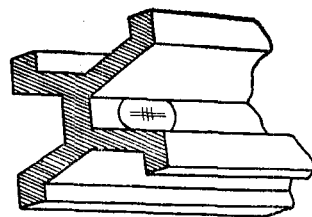


图1 国际米的一端

位。同时，国际计量局还从这批米尺中留下几根作为工作原器。为了确保这种复现的一致性，“米制公约”中还规定要周期检定国家基准。

二、长度基本单位“米”的定义第二次更改及其优点

随着科学技术的进步，发现国际工作米原器与分发给各国的副米原器随时间推移而发生变化，这作为基本单位的米原器是不允许的。其次，所有米原器随时随地还有损坏和毁灭的危险，如战争和自然灾害等。第三，由于米原器的刻线工艺和测量方法等原因，复现量值的不确定度只能保持在 $\pm 1.1 \times 10^{-7}$ 量级，即1m的误差为 $\pm 0.11 \mu\text{m}$ ，难于适应物理学和工程技术发展的要求。为此，许多科学家进行了大量有关长度基准的研究工作。其中早在1827年，法国物理学Babinet曾提出：必须从可见波长中而不是在实物的尺寸中来寻找长度基准。1859年，麦克斯韦也曾建议选择钠的黄色谱线的波长作为自然长度基准。1890年，美国物理学家迈克尔孙发现了一种辐射，即自然镉的红色谱线，其清晰度和复现性在当时都是无与伦比的。1892—1893年间，他与J. R. Benoit合作，将一台特制的干涉仪送到国际计量局，相对国际米原器测量了这种谱线的波长，即得到在15 $^{\circ}\text{C}$ 时的干燥空气里，这个波长为

1) 这一定义在1927年第七届国际计量大会上又作了补充：米的长度等于0 $^{\circ}\text{C}$ 及标准大气压的条件下，米原器轴线方向上两端线间的距离。

$$\lambda_{cd} = 6438.4696 \times 10^{-10} \text{ m.}$$

1906年, C. Fabry 和 A. Perot 利用他们发明的法布里-珀罗标准具, 也证实了上述结果。1927年国际协议将这条谱线作为光谱学的长度标准, 其单位是埃(\AA)是由

$$\lambda_{cd} = 6438.4696 \text{ \AA}$$

来定义的。同年, 第七届国际计量大会建议利用光波波长来复制米, 将镉红线的波波长, 在含有 0.03% (体积) CO_2 的干燥空气内, 在 15°C 及一个大气压下, 同米原器比较, 结果为 1m 等于这种光波波长的 1553164.13 倍。这样就将米原器刻线距离 (1m) 稳定在镉红线的波长上了。此后, 各国不少科学家仍继续进行光波测定的研究工作, 其中主要有苏联全苏计量科学研究所测定 ^{114}Cd 的红线光谱的波长, 美国国家标准局研究测定 ^{198}Hg 绿色光谱线的波长和联邦德国物理技术联合研究所研究测定 ^{86}Kr 的橙色谱线的波长。上述三条谱线中最窄的一条就是 ^{86}Kr 的橙色谱线, 这条谱线能在最小扰动下产生, 并能用其它方法测量。谱线是在一热阴极放电管中的毛细管冷到氮三相点温度 (63.15 K) 时产生的, 如图 2 所示。此外, 自吸收对其轮廓的影响较小, 而且其亮度也是充分的。于是, 在 1960 年 10 月 14 日召开了第十一届国际计量大会, 讨论了从 1927 年开始采用的镉红线光波长能否过渡到其它光波波长的问題。最后会议通过了将上述谱线代替镉红线光波长, 并决定改换“米”定义, 即

“米的长度等于相当于 ^{86}Kr 原子的 $2\text{P}_{1/2}$ 到 5d , 能级之间跃迁的辐射在真空中波长的 1650763.73 倍”。这是“米”的第二次定义, 其准确度为 4×10^{-9} , 相当于在 $1 \times 10^3 \text{ km}$ 的长度测量中不差 4 mm。

采用以原子辐射的单体波长来确定长度单位比采用以铂铱米原器上两刻线间的距离要优越得多, 其主要优点如下:

首先, 原子辐射的单体波波长是物质本身的属性, 是不变的自然现象, 这样能保证长度量值高度稳定, 永恒不变。

其次, 原子辐射的光波波长具有极高的复

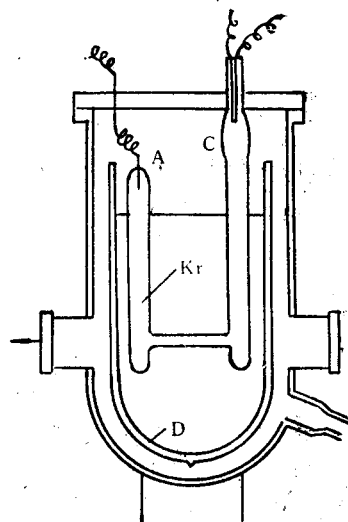


图 2 在低温恒温器中的 ^{86}Kr 灯
A 为阳极; C 为阴极; D 为杜瓦瓶

制精度与传递精度, 根据研究结果 ^{86}Kr 原子辐射的橙黄谱线波长在一定条件下复制精度可达 10^{-9} (相对误差)。另外, 它的量值可以用“光干涉方法”传递, 既精密又方便。对于良好的干涉测量仪器传递精度可达到 10^{-8} 。而米原器由于两条刻线质量的限制, 用显微镜瞄准总存在偏差, 在最好的情况下, 它的复制精度与传递精度都不能超过 10^{-7} 。

第三, 原子辐射的光波波长是自然长度基准, 在自然界中, ^{86}Kr 原子是永不会消灭的, 因此长度基准也永不会毁灭, 另外保存和维护也很方便。

但是, ^{86}Kr 原子辐射的橙黄谱线波长的干涉长度最佳的情况只有 800 mm, 因此要想用光波直接干涉测量 1 m 以上的长度是不可能的。这是新长度基准的最大缺陷。另外, 新长度基准还受电流、温度等影响, 要进一步提高复制精度十分困难。基于这些原因, 第十一届国际计量大会关于“米”定义的决议中, 要求继续改进长度基准。

三、长度基本单位“米”第三次更改定义及其意义

众所周知,60年代初期出现了新型光源——激光,由于它的单色性和相干性远比 ^{86}Kr 优越,不久就开始了用激光代替 ^{86}Kr 作为长度基准的研究,特别是60年代末激光频率测量技术崭露头角并取得了突破性的进展。于是,从1973年又开始了讨论如何重新定义长度基本单位“米”。其讨论内容大致可以分为两大类:一类意见是用某一种稳定激光波长的倍数来定义;另一类意见是用稳定激光的频率值通过光速来定义。前者用波长的倍数来定义是符合长度计量传统观念,它与用 ^{86}Kr 的“米”定义之间保持了继承性,因此得到了一些科学家的支持;后者是用频率值定义,从而打破传统观念,因为这种定义方式使长度单位实际上不再是独立复现的物理量,而是依赖于时间或频率单位的量。目前,频率是迄今人类所有测量中最准确的物理量,光速又是一个基本物理常数,一旦固定后可以没有误差,其导出波长值可以与频率测量值具有相同的准确度(频率测量的准确度可望达到 10^{-13} 量级),因此用频率定义“米”的主张最后取得通过。于是,1983年10月召开的第十七届国际计量大会通过了“米”的新定义,即

“米是光在真空中于 $1/299792458$ 秒的时间间隔内所经路径的长度”。该次会议同时废除了1960年以来使用的建立在 ^{86}Kr 原子在 $2P_{10}$ 与 $5d_5$ 间跃迁的“米”定义。另外还要求国际计量委员会选择一些波长标准的辐射线,用于长度干涉测量。

根据国际计量委员会的推荐,第三次新“米”定义的实现方法有时间法、频率法和辐射波长法三种,它们都是建立在真空中光速 c 为确定值的基础上。

1. 时间法

如果平面电磁波在真空中,时间间隔 t 行进路径的长度为 l ,则有

$$l = ct.$$

在测得 t 后,即可求出 l 。由于 l 为 1m 时, t 仅为 $1/299792458\text{s}$,所以 l 必须很大才能得到高的计量准确度,这种方法主要用于天文学和大地测量学。

2. 频率法

如果平面电磁波的频率为 f ,而它的真空波长为 λ ,则有

$$\lambda = c/f.$$

在测到 f 之后,即可求出 λ 。其具体方法是:采用由一系列激光器(例如甲醇激光器、二氧化碳激光器、色心激光器、氦氖激光器等),内插锁相微波源和非线性谐波混频器(例如肖特基二极管、约瑟夫森结和MIM二极管等)组成的频率链,将铯原子束时间频率基准的频率逐级倍频到红外和可见光区,然后通过各级差频计数的方法求出激光的频率。

目前进行激光频率测量研究的国家主要有美国、苏联、英国、法国、联邦德国和中国等。美国国家标准局(NBS)1973年首次完成了从铯基准至 $3.39\mu\text{m}$ 甲烷稳定激光的频率测量,准确度达 6×10^{-10} ,并由此得到了目前国际推荐使用的光速值: $c \equiv 299792458\text{ m/s}$ 。1980年前后,苏联、英国、法国三国将甲烷谱线频率测量的精度提高到 $(2-3) \times 10^{-11}$ 。1982年,美国NBS首次把 576 nm 和 633 nm 两条可见光区域的碘吸收谱线的频率值进行了测量,报道的精度为 1.6×10^{-10} 。

3. 辐射波长法

1983年国际计量委员会推荐了以下五种激光辐射和两种同位素单色光辐射的真空波长值和频率值,用它们中的任何一种辐射波长均可复现米。五种激光辐射的谱线及相对不确定度见表1。另外,两种同位素单色光辐射为:一是 ^{86}Kr 原子的 $2P_{10}-5d_5$ 能级之间跃迁所对应的辐射,真空波长值为

$$\lambda = 605780210\text{fm},$$

其相对不确定度为 4×10^{-10} ,适用于在1960年国际计量委员会规定条件下工作的光谱灯辐射;二是1963年国际计量委员会推荐的 ^{86}Kr ,

(下转第660页)