

# 米的最新定义与稳频激光器

赵克功

(中国计量科学研究院)

两千多年前,秦始皇就在中国的土地上统一了度量衡.例如,那时的长度单位“累黍定尺”和“黄钟律管”。“累黍定尺”是利用了统计学,而“黄钟律管”则是利用了波长与频率的关系.这和今天利用波长与频率的关系得到光速值来定义长度单位米的原理是近似的.可见我们的祖先早在两千年以前就探索利用自然规律作为物理量的标准.

本文就新米定义的建立、实现和新米定义在生产及科学技术中的作用,作一简要介绍.

## 一、米和米的最新定义

“米”这一长度单位的历史,开始于十八世纪法国大革命后期.当时,在欧洲人们想结束长度单位不统一的混乱局面,并选择一个各国都能接受的新名词作为长度单位的名称.当时的米制公约的组织者们,就选用了古希腊文“Metron”这个词(意思是量度、测量,与英文 Measure,法文的 Mesures 和德文的 Maß 的意义相同),后来又发展为“Mètre des Archives”(意思是档案米)<sup>[1]</sup>.这就是“米”这个词的来源.图1表

示了米的历史<sup>[2]</sup>和它的三次变更.

更改物理量基本单位的定义时,必须严格地遵守基本单位量值的延续性,即新定义的量值,应保持在原定义精度范围内与原定义的量值完全相等.例如,新定义的米,应在  $4 \times 10^{-9}$  精度范围内与氪-86 定义的一米长度量值相等.否则将造成从自然科学到人民日常生活上全世界性的混乱,其经济损失将不堪设想.在充分保持米的延续性基础上,目前米定义更改的主要原因有以下几点<sup>[3]</sup>:

1. 原米定义(氪-86 灯橙黄色谱线)的精度 ( $4 \times 10^{-7}$ ) 不能满足科学技术和生产发展的要求;
2. 稳频激光器的进展使激光频率的复现性已远优于氪-86 灯米定义的精度;
3. 稳频激光器频率测量技术的进展和所测得的真空光速值的准确度受到了原米定义的限制;
4. 根据频率和光速值导出的波长值,其精度比氪-86 灯基准辐射谱线波长值的精度更高;
5. 保持 1973 年推荐的真空光速值( $c = 299$

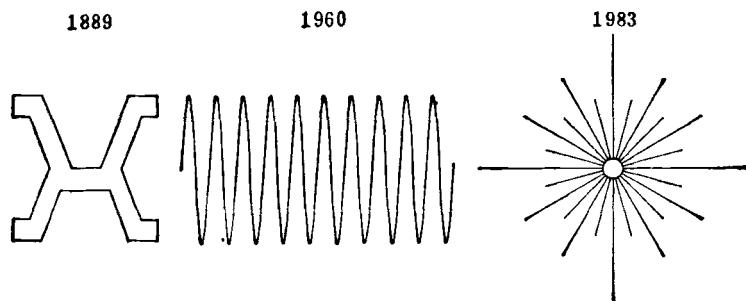


图1 米的三次变更

1889: 表示国际米原器的横截面; 1960: 正弦曲线表示氪-86 灯发射的波长作为米定义; 1983: 太阳表示利用光速值作为米定义

792 458 m/s) 不变,对天文学和空间科学是非常有利的.

根据上述情况,第十七届国际计量大会于1983年10月20日在巴黎通过了新米定义为:

“米是光在真空中,在1/299 792 458秒的时间间隔内运行路程的长度”.(中文)

“Le mètre est La Longueur du trajet parcouru dans Le vide par La Lumie're pendant une durée de 1/299 792 458 de seconde.”(法文)

“The metre is the length of the path travelled by Light in vacuum during a time interval of 1/299 792 458 of a second.”(英文)

“Das meter ist die Länge der strecke, die Licht im vakuum während des intervaller von 1/299 792 458 sekunden durchläuft”(德文)

## 二、贯彻(执行)米的新定义

### 1. 实现(执行)米定义的三个途径

国际计量大会在通过新米定义的同时,通过了米定义的三种实现(执行)途径.

(1) 利用光的飞行时间测量长度.在真空中,距离的长度 $l$ 是测量一个平面电磁波通过距离的长度 $l$ 的飞行时间 $t$ 得到.这是利用 $l = ct$ 的关系. $c$ 是真空光速值( $c = 299\,792\,458\text{m/s}$ ).

(2) 借助频率为 $f$ 的平面电磁波的真空波长 $\lambda$ ,这个波长 $\lambda$ 是利用测量平面电磁波的频率 $f$ ,通过关系式 $\lambda = c/f$ 得到的.

(3) 借助几种稳频激光器的频率(波长)值,这些稳频激光器是按一定方法进行稳频的,并在规定的条件下工作,可以得到一定精度的稳频激光器的频率(波长)值.这些稳频激光器是:

(a) 甲烷稳频 $3.39\,\mu\text{m}$ 激光器:  $3.39\,\mu\text{m}$  氩氟激光器的频率被稳定在甲烷分子超精细结构谱线 $\nu_3, P(7), F_2^{(2)}$ 分量上,

$$f = 88\,376\,181\,608\text{ kHz},$$

$$\lambda = 3\,392\,231\,397.0\text{ fm},$$

相对不确定度为 $\pm 1.3 \times 10^{-10}$

(b) 碘稳频染料激光器:  $576\text{nm}$  染料激光器稳频在碘-127分子超精细结构谱线17-1, P(62), O分量上,

$$f = 520\,206\,808, 51\text{ MHz},$$

$$\lambda = 576\,294\,760, 27\text{ fm},$$

相对不确定度为 $\pm 6 \times 10^{-10}$ .

(c) 碘稳频 $633\text{ nm}$ 激光器:  $633\text{ nm}$  激光器稳频在碘-127分子超精细结构谱线11-5, R(127), i分量上,

$$f = 473\,612\,214, 8\text{ MHz},$$

$$\lambda = 632\,991\,398, 1\text{ fm},$$

相对不确定度为 $\pm 1 \times 10^{-9}$ .

(d) 碘稳频 $612\text{ nm}$ 激光器<sup>1)</sup>:  $612\text{ nm}$  激光器的频率稳频在碘-127分子超精细结构谱线9-2, R(47), O分量上,

$$f = 489\,880\,355, 1\text{ MHz},$$

$$\lambda = 611\,970\,769, 8\text{ fm},$$

相对不确定度为 $\pm 1.1 \times 10^{-9}$ .

(e) 碘稳频氩离子激光器:  $515\text{ nm}$  氩离子激光器稳频在碘-127分子超精细结构谱线43-O, P(13), a, 分量上,

$$f = 582\,490\,603, 6\text{ MHz},$$

$$\lambda = 514\,673\,466, 2\text{ fm},$$

相对不确定度为 $1.3 \times 10^{-9}$ .

### 2. 三点说明

利用上述三种途径实现米定义,必须进行以下三个影响因素的修正<sup>[5]</sup>.

#### (1) 折射率的修正

在地球表面按新米定义规定测量长度,光总是在一定的气压下进行,所以必须进行折射率的修正,修正量在 $\pm 10^{-7}$ 数量级范围内.

#### (2) 衍射效应的修正

实现米定义三种途径,都是利用光波建立在平面电磁波 $\exp[i(kx - \omega t)]$ 的基础上.但是,在实际工作中,光束总是受到光学元件几何尺寸的限制,即没有 $\exp[i(kx - \omega t)]$ 这样的平面电磁波,所以要进行衍射修正.修正量在

1) 国际计量局(BIPM)按赵克功研制的碘稳频 $612\text{nm}$ 激光器参数,推荐作为国际标准,请见参考文献[4].

$\pm 10^{-9}$  范围内。

### (3) 引力场效应

新米定义仅适于没有引力场的空间或在恒定的引力场空间,但是这样的空间是难找到的,所以要进行引力场或相对论效应的修正。这种效应已有实验证明是存在的<sup>[5]</sup>,修正量小于  $10^{-12}$ 。

### 3. 新米定义的特点

新米定义首先将真空光速值规定为:  $c = 299\,792\,458\text{m/s}$  是一个固定常数,真空光速值在物理学中不再是一个可以测量的量,而是一个换算常数,并作为一个物理学中的基本物理常数规定下来。

## 三、稳频激光器

一台激光器输出的纵向单模的频率为  $\nu = q \frac{c}{2nL}$ , 其中  $c$  为真空光速值,  $n$  为激光腔内的折射率,  $L$  为激光谐振腔长度;  $q$  是正整数即  $nL = q\lambda/2$ 。激光谐振腔由于外界振动等干扰引起激光输出频率相对变化为  $\Delta\nu/\nu = -\Delta L/L$ 。

所以,激光谐振腔长度的变化是引起激光输出频率不稳定的主要原因之一。要提高激光输出频率的稳定性,必须首先克服激光谐振腔变化的影响。从六十年代中期以来,物理学家与计量学家就利用原子、分子饱和吸收光谱学研究激光频率,将激光频率稳定在对应的原子分子超精细结构谱线上。得到了甲烷饱和吸收稳频  $3.39\ \mu\text{m}$  激光器<sup>[6]</sup>、碘稳频  $633\ \text{nm}$  激光器<sup>[7]</sup>、碘稳频  $612\ \text{nm}$  激光器<sup>[8]</sup>、碘稳频  $515\ \text{nm}$  氩离子激光器<sup>[9]</sup> 和碘饱和吸收稳频的  $576\ \text{nm}$  染料激光器<sup>[10]</sup> 等。它们的频率稳定性都为  $10^{-12}$ ,复现性为  $10^{-11}$  以上。作者最近在  $640\ \text{nm}$  范围内又发现了碘-127 分子 8-5, P(10) 的 15 条超精细结构谱线<sup>[11]</sup>,并利用其中  $a_9$  分量对  $640\ \text{nm}$  激光器进行了稳频的研究,于 1983 年秋,得到了新型碘稳频  $640\ \text{nm}$  激光器的频率稳定性优于  $10^{-12}$ ,复现性  $1 \times 10^{-11}$ 。有希望作为国际标准。

## 四、稳频激光器的频率测量

稳频激光器的频率主要在可见光波段内,频率高达  $10^{14}\ \text{Hz}$  (约  $10^8\ \text{MHz}$ ),所以直接测量

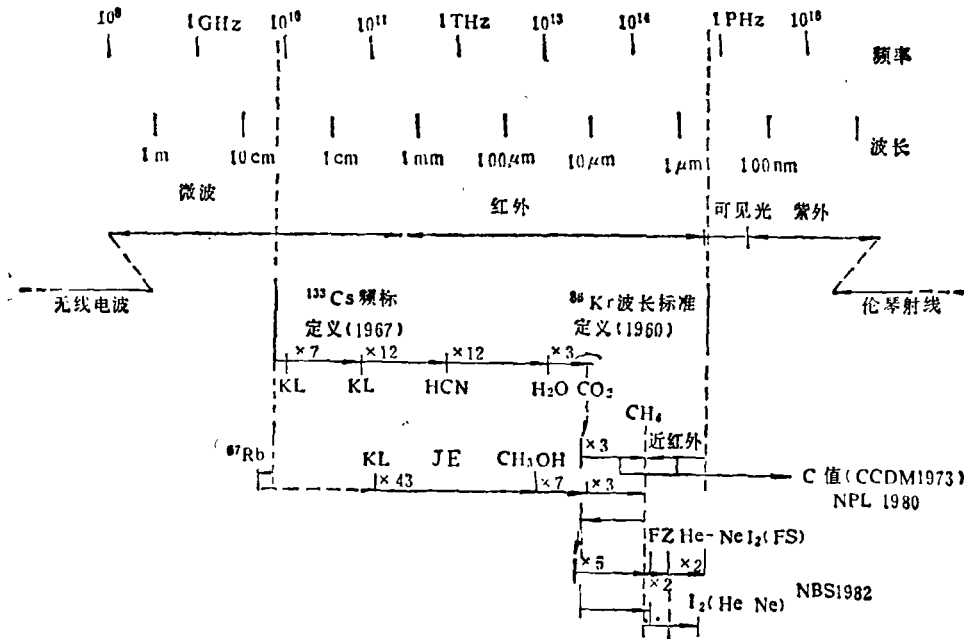


图2 NBS 为美国标准局; NPL 为英国皇家物理研究所

稳频激光器的频率,目前困难很大.六十年代末,美国标准局(NBS)利用钨-镍触须二极管(MIM即金属-绝缘层-金属)接收了激光与激光、激光与微波间的频差.利用频率综合的方法<sup>[12]</sup>,即为了测量一种未知的激光频率 $\nu_x$ ,必须找到两种已知频率 $\nu_1$ 和 $\nu_2$ 的激光,使它们的多次谐波的叠加与 $\nu_x$ 相近,其差值再用频率为 $\nu_3$ 的速调管之谐波来补偿,即 $\nu_1, \nu_2, \nu_3$ 应满足下式:

$$\nu_x = n\nu_1 \pm m\nu_2 \pm L\nu_3,$$

利用这种方法, Evenson 等人首先实现了对 88 THz (甲烷稳频 3.39  $\mu\text{m}$  激光器) 频率的测量. 这方面知识请见文献 [12].

图 2 利用最简单的方式表示了电磁波从无线电波到伦琴射线整个频谱范围内目前实现了的频率链. K1 为速调管;  $\times n$  为频率谱波级次数; HCN 为氰化氢激光器;  $\text{H}_2\text{O}$  为水蒸气激光器;  $\text{CO}_2$  为二氧化碳激光器, 它的频率范围从 26.6 THz 到 33.0 THz;  $\text{CH}_4$  为甲烷稳频 3.39  $\mu\text{m}$  激光器, 频率为 88 THz, 波长为 3.39  $\mu\text{m}$ ;  $^{87}\text{Rb}$  为铷频标; JE 为利用约瑟夫结作为混频元件;  $\text{CH}_3\text{OH}$  为甲醇激光器; FZ 为色心激光器, 频率在 130 THz 和 125 THz 范围内; He-Ne 为氦氖激光器, 频率为 260 THz, 波长为 1.15  $\mu\text{m}$ ;  $\text{I}_2(\text{FS})$  为碘-127 稳频的染料激光器, 频率为 520 THz, 波长为 576  $\mu\text{m}$ ;  $\text{I}_2(\text{He-Ne})$  为碘-127 稳频氦氖激光器, 频率为 474 THz, 波长为 633  $\mu\text{m}$ .

从图 2 可知, 目前从微波频率测量到可见光频率有两个频率链. 随着激光技术的迅速发展, 用于光频测量的激光频率链将越来越简化, 例如西德 Otto Weiß 最近利用了一台远红外激光器可将微波频率直接过渡到  $\text{CO}_2$  激光频率.

## 五、米的最新定义在生产 和科学技术的作用

### 1. 在计量科学中的作用

稳频激光器是实现米定义的基础, 稳频激光器的频率测量是实现米定义重要技术手段之

一. 由于新米定义的通过, 我国必须按新米定义建立新型的实现新米定义的国家级装置和国家新长度单位标准. 新米定义将会对  $\pm 4 \times 10^{-9}$  精度以上的测量直接产生影响. 在一般的计量技术和测量中影响较小. 但是, 新米定义用于地球物理学、大地测量、空间技术和天文学的测量以及利用稳频激光器新技术对微小尺寸的测量(如 10  $\text{\AA}$  以下)将有重要意义. 同时, 可利用新米定义统一从无线电波到硬 X 射线的波长值.

中国计量科学研究院从 1964 年 5 月开始从事研制稳频激光器. 早期(六十年代)研制成功的兰姆凹陷稳频 633 nm 激光器<sup>[13]</sup>已广泛的应用于计量学、测量技术、精密仪器等许多领域, 并产生了较大的经济效益. 例如:

#### (1) 光电光波比长仪

它是用来统一全国长度单位量值——刻线米尺的高精密仪器. 测量精度为 0.1  $\mu\text{m}$ . 它就是利用稳频激光器辐射稳定的波长值作为标准来检定全国各行各业用的米尺. 过去没有稳频激光器, 测量一米刻线尺要三个人为一组的进行倒班, 需要近三个月的时间才能检定一根工作标准米尺, 而精度比现在要低一个量级. 现在利用激光技术实现测量全部自动化, 只需十几分钟就可检定完一根标准米尺.

#### (2) 激光丝杠检查仪

它用于鉴定零级丝杠, 精度为 1.5  $\mu\text{m}$ . 这对发展我国机床(特别是精密机床)、精密仪器等起到推动的作用. 北京密云机床研究所用激光丝杠检查仪每年要检定数千尺丝杠. 过去我国没有丝杠检查和检定装置.

#### (3) 激光重力仪

它用于测量重力加速度  $g$ , 测量精度大约为  $10^{-8}$ . 可以用来建立国家重力网, 在航天工程、探矿、地球物理学和地震预报中都有重要用途. 过去我国没有绝对测量重力加速度  $g$  的装置, 只是在五十年代初从民主德国引进的一个重力点, 其精度大约仅为  $10^{-6}$ .

另外, 甲烷稳频 3.39  $\mu\text{m}$  激光器和碘稳频

(下转第 451 页)