

光速的精密测量*

——长度和时间基准的统一

赵克功 倪育才 刘忠有

(中国计量科学研究院)

一、引 言

光速是一个最基本的物理常数,因此,光速的精密测量问题不但是光学中的一个重要问题,也是物理学中的一个很重要的问题。

最初测量光速的方法是根据天文方面的观测,首先是由丹麦天文学家罗麦(1676)用观测木星的卫星蚀的方法测量的。后来,布喇得雷(1728)又从观测光行差的方法来测量。用天文观测的方法准确度(只有百分之几)比较低,因此后来就发展了用实验室方法来测量光速。

实验室方法最早是斐索(1849)的遮断法,之后是傅科(1862)的旋转镜法,当时测量的准确度都很低,只有几百千米/秒的量级(即千分之几的准确度)。1926年,迈克尔逊将旋转镜法的测量准确度提高到4千米/秒(即 1.3×10^{-5})。1948年后,逐步采用了较先进的技术,测量准确度也不断提高。目前较精密测量光速 c 的方法有两类,一类称为测距仪法,它是测量光在一固定距离内的飞行时间,这个固定距离是由一基线所确定的。这种方法中的光源用克尔盒进行调制,用同一个振荡器调制的光电倍增管作为检测器(调制频率约为10兆赫,基线约为10千米),这种测量的最佳值为

$$c = 299792.6 \pm 0.25 \text{ 千米/秒 (0.83 ppm).}$$

另一类测量方法是微波干涉仪法,这种方法由英国物理研究所的 Froome 得到了下列较好的结果:

$$c = 299792.50 \pm 0.10 \text{ 千米/秒 (0.33 ppm).}$$

这两种方法所测的结果基本上是一致的。其他方法测量的准确度要低一些。因此,目前所测得的光速的最高精度达 3×10^{-7} 。1969年的基本物理常数平差后的推荐值(Taylor等人)为^[1]

$$c = 299792.50 \pm 0.10 \text{ 千米/秒 (0.33 ppm).}$$

光速值的准确度不断提高,对于物理学和其他科学技术的发展起到很大的作用。

最近,由于对用甲烷饱和吸收稳定的氦氖3.39微米的红外激光的波长和频率分别进行了十分精确的测量,致使频率和波长的乘积所得到的光速值的准确度已达 3.5×10^{-9} ^[2],

* 1973年3月2日收到。

即比目前国际公认值的准确度提高了100倍。据目前估计,这种方法的准确度还有可能进一步提高,这就为精密测量光速开辟了一条新的途径。

二、光速的测量:激光波长和频率测量方面的进展

1. 长度基准

1960年第十一届国际权度大会上决定用 ^{86}Kr 原子的6057埃谱线的波长来定义“米”,实现了长度的自然基准。该谱线的相对宽度是 8×10^{-7} ,干涉能力仅为800毫米,输出功率约0.1微瓦,在所推荐的使用条件下,波长准确度为 1×10^{-8} 。这样的准确度虽然已能满足工业生产上的要求,但对许多科学研究上的要求还相差很远。

几乎在 ^{86}Kr 作为长度基准的同时,激光就诞生了。由于它的相干性强,功率高,并且控制后的激光频率(波长)的稳定性和复现性都很高,可以取代 ^{86}Kr 作为未来的长度基准。因此,1962年后国际权度局就号召有条件的各国计量部门和物理部门进行这方面的研究。

气体激光器在理论上的宽度可达 3×10^{-17} 。1962年Javan等人测到了约 10^{-14} 的宽度^[3],并且预计如果能更好的改善振动、温度变化、量子噪声等因素对激光器的影响,所得之单色性还能提高。这样好的单色性是 ^{86}Kr 灯所无法比拟的。要使激光器取代 ^{86}Kr 作为长度基准,必须得到高度的稳定性和复现性,并能以优于 1×10^{-8} 的精度测量其波长。

2. 激光器的频率稳定

激光输出频率基本上决定于腔的谐振频率,而谐振频率的变化则与谐振腔长 L 的变化成比例的。因此如果要得到 10^{-8} 的频率稳定性,则必须使 L 稳定到 10^{-8} 。但要采用恒温或减振等办法来得到这样的稳定性是不可能的,因为我们既不能使谐振腔的温度变化保持在0.01度以内(激光管本身是个发热体),又不能完全消除振动、声音等力学上的影响,而这些因素很可能使腔长产生 10^{-8} 或更大的变化。因此要得到 10^{-8} 或更高的频率稳定性,就必须采用伺服控制系统对激光器进行稳频。

第一个自动控制伺服系统是Rowley和Wilson在1963年实现的,他们使激光频率稳定在增益曲线的极大值,得到了 2×10^{-8} 的稳定性^[4]。

1964年霜田和Javan采用了同位素激光管,将激光频率稳定于Lamb下陷的中心,得到了 6×10^{-10} 的稳定性^[5]。

还有一些其他的方法,例如利用塞曼效应,法拉第效应等等,所得到的稳定性大约都在 10^{-9} 左右。

上述这些方法都是利用激光原子谱线的特性,虽然稳定性能达到 10^{-9} 或更高,但复现性仍很低,只有 1×10^{-7} ^[6]。复现性低的主要原因是气压变化造成的频率漂移。此外,塞曼效应和斯塔克效应也会产生频率漂移。

利用氦激光(1.15微米)或氦的饱和吸收来进行稳频,由于其所需的气压低,因此压力位移小,复现性可以稍高,估计能达到 10^{-9} 左右。

至今,比较好的一种办法是用分子光谱作为波长的绝对标准,其中以用甲烷在 3.39 微米的吸收线来稳定 3.39 微米氦氖激光器较有成效。当将甲烷吸收室置于谐振腔中时,与产生 Lamb 下陷的原因相似,在甲烷吸收线中心的吸收会减小,因此激光输出会有一突然的增加,出现所谓反 Lamb 下陷。在 1968 年 Barger 和 Hall 测得其宽度仅为 350 千赫^[7],因此将激光输出稳定于反 Lamb 下陷的中心,就可能得到很高的稳定性。

甲烷分子吸收谱线的主要优点是吸收跃迁的上下能级的自然寿命都很长,谱线的自然宽度很窄;塞曼效应和斯塔克效应都很小;其吸收系数很大,可在低温低压下工作,因此多普勒宽度很窄,并且压力位移所造成的频移是很小的。

由于上述原因,采用甲烷的饱和吸收装置可以得到极高的频率稳定性和复现性。

美、苏、日等国在 1968 年前后相继开始这项工作,目前最高已达到 5×10^{-15} 的稳定性和 3×10^{-14} 的复现性,并预计还有可能提高^[8]。

因此,在 1970 年召开的国际权度局米定义咨询委员会第四次会议上正式建议各国研究用甲烷的饱和吸收激光器作为长度基准^[9]。

3. 激光波长的测量

激光波长的精密测量一般采用两种方法:迈克尔逊型的双光束干涉仪和法卜利——珀罗干涉仪。

过去波长测量的精度一直比较低,约为 10^{-8} — 10^{-9} 量级,在红外区域就更低,仅为 10^{-6} 量级。这一方面是由于光学部件的物理性能的限制,另一方面是由于波长标准的精度仅为 1×10^{-8} ,也限制了测量精度的进一步提高。在红外区域还有接收方面的困难,并且与标准波长不在一个波段,不仅对干涉仪提出了更高的要求,而且在过渡时也带来了较大的误差。

自 1969 年以后国际权度局及美、苏、日、西德各国都进行了 3.39 微米激光波长的测量和研究,国际权度局第一次报导的测量精度是 6×10^{-8} ^[10]。最近美国的 Barger 和 Hall 在波长测量上取得了较大的成就,已测出 3.39 微米氦氖激光的波长为

$$\lambda = 3.392\ 231\ 376(12)\ \text{微米}.$$

准确度为 3.5×10^{-9} ,已达到目前长度基准 ^{86}Kr 准确度的极限^[11]。

4. 激光频率的测量

虽然,时间基准的准确度已达到 10^{-13} 的量级,但由于技术方面的困难,光频的直接测量过去一直是无法解决的问题,而只能由光的波长测量通过光速值进行计算,因此准确度一直很低。自 1967 年以后,由于对接收器件的研究和改进,光频的直接测量有了飞速的发展。

1967 年第一次测量了 0.89 埃赫¹⁾(337 微米)的氰化氢激光的频率。此后频率测量的上限迅速地扩大了,目前已经测量了 3.8 和 10.7 埃赫(78 和 28 微米)的水蒸气激光频率,28 埃赫(10.6 微米)的二氧化碳激光频率和 56 埃赫(5 微米)的一氧化碳激光频率,88 埃

1) 1 埃赫 = 10^{14} 赫

赫(3.39 微米)和 474 埃赫(0.63 微米)的氦氖激光的频率。

最近 Evenson 等人发表了一系列的文章,他们采用了频率综合的方法,建立了速调管和各种激光器的激光频率链(表 1),这就将微波频率测量逐步过渡到光学频率的测量。

频率综合的方法可以解释为:为了测量一种未知的激光频率 ν_x , 必须找到两种已知频率的激光 ν_1 和 ν_2 , 使它们的多次谐波的迭加与 ν_x 相近, 其差值再用频率为 ν_3 的速调管之谐波来补偿, 即 ν_1 、 ν_2 、 ν_3 应满足下式:

$$\nu_x = n\nu_1 \pm m\nu_2 \pm l\nu_3.$$

最近 Evenson 等人又实现了 88 埃赫(3.39 微米)的氦氖激光频率的测量^[12]。他用钨镍点接触二极管作为混频器, 将二氧化碳激光的 R [30] 谱线的三次谐波及 48 京赫(10⁹ 赫)的速调管与被测频率综合对于用甲烷稳定的氦氖激光器, 其测量结果为

$$\nu = 88.376\ 181\ 627(50)\ \text{埃赫}.$$

准确度高达 6×10^{-10}

因此, 由频率和波长乘积所得到的光速值为

$$c = \lambda\nu = 299\ 792\ 456.2(1.1)\ \text{米/秒}.$$

这个数值与公认值 $2.9979250(10) \times 10^8$ 米/秒是符合的, 但准确度提高了 100 倍。

除了频率链的方法之外, Bay 等人^[13]应用微波频率对激光频率进行调制的方法, 直接测量了 6328 埃可见光激光的频率。

这种方法的主要原理是用微波频率 ω 对激光频率 ν 进行电光调制, 而产生边带频率 $\nu \pm \omega$ 。这两个边带被引入到一个抽空的法卜利-珀罗腔中。腔长 L 和 ω 同时被调整, 使两边带以最大强度通过腔。当达到这一点时, 两个边带频率的比就是腔中两个级次(分别为 N_+ 和 N_-)之比。因此, 光频可以表示为

$$\nu = [(N_+ + N_-)/(N_+ - N_-)]\omega,$$

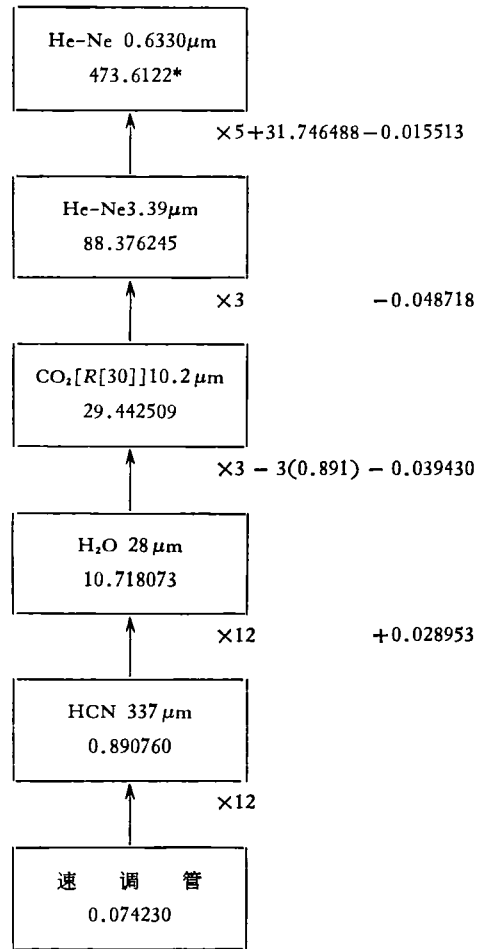
或

$$\nu = (N/n)2\omega,$$

式中

$$N = (N_+ + N_-)/2$$

表 1 激光频率链



以上频率均以埃赫(10¹² 赫)计。

* 由波长测量得出。

为 ν 的级次,而

$$n = N_+ - N_-$$

是两个边带频率之间的相 2ω 的级次。于是干涉仪建立了光学和微波频率之间的关系。

这样,光学频率可以用微波频率的测量和级次 N 和 n 的测量来确定。当然还必须考虑它们的衍射和反射相移修正。这种方法只与时间基准和频率测量有关,而不依赖于任何长度单位的确定。

实验所测得的 6328 埃氦氖激光的频率为

$$\nu = 473\,612\,166 \pm 29 \text{ 兆赫,}$$

准确度为 6×10^{-8} 。这是可见光范围内光学频率的第一次绝对测量。这种方法直接使光频和微波频率建立关系,而不借助于中间过渡的频率链,这是简便之处,但目前准确度尚未达到频率链的相应水平。

6328 埃的波长测量值为

$$\lambda = (632.99147 \pm 1) \times 10^{-5} \text{ 毫微米。}$$

因此,可得光速值为

$$c = \lambda\nu = 299\,792\,462(18) \text{ 米/秒。}$$

准确度为 6×10^{-8} ,比国际公认值的准确度提高了五倍。

因为甲烷稳定激光器的频率稳定性已可达 5×10^{-15} ,而微波领域的频率测量准确度已达 10^{-12} ,因此光频的测量提高到 10^{-11} ,甚至与铯原子钟的准确度相当也是可能的。波长测量的准确度虽然目前受长度基准的限制,但随着未来长度基准的准确度的提高,波长测量的准确度也可能进一步提高。因此在不远的将来完全有可能以更高的准确度来测量光速。

可以预期,如果光速测量的准确度达到了很高以后,就可以借助于准确度很高的时间基准来测量长度。因为光速可以认为是不变的,一旦定义了光速值后,长度就可以用时间及光速来表示。长度测量就变成了光的飞行时间的测量,而波长测量就变成了光频率的准确测量。这样不仅可以大大提高长度的测量精度,而且也实现了长度和时间基准的统一。

三、精密测量光速的意义和应用

精密测量光速在物理学上有很大的理论意义。因为一切相对论效应的计算都要用到光速值。光速的精密测量可用于在地球表面上进行检验广义相对论的实验,也有可能进一步预言广义相对论的某些新效应。

在精密测量方面,它在追踪卫星和宇宙飞船、测量行星距离、远距离测量和提高精密仪器制造的精度等方面有较广泛的应用。此外,改善测量光速的调谐激光器的控制,将使污染物微量研究取得新的进展;同时,这种测量光速用的超稳定激光器所测定的频率,将使电讯扩展到完全崭新的频率范围,扩大现有频段近 200 倍。红外和可见光频率的测量将可用于重新测量诸如跃迁频率、 g 因子、斯塔克系数之类的光谱学常数,精度有希望远超过目前所用的光学干涉技术的精度。

精密测量光速在计量学上也有很大的意义,它可以使长度与时间两大基准在精确的光速值基础上统一起来。由于频率的测量准确度远高于波长的测量准确度,因此就可以借助于高精度的时间基准来测量长度。由于激光器的频率稳定性在理论上可达 10^{-17} 的量级,目前,甲烷稳定激光器已达 10^{-13} 以上,因此继续提高激光频率的测量精度还存在很大的潜力。

计量学中很多基标准的测量都与光速的准确度有关。如计算电容的准确度最终与 $1/c^2$ 有关,目前光速的准确度为 3×10^{-7} 这就给计算电容带来 6×10^{-7} 的误差。而目前计算电容的精密度高已达 1×10^{-8} (英国),要使它的准确度也达到这个值,必须使光速数值准确到 5×10^{-9} 。这是计算电容对光速准确度的要求。再如,1968年的温标改值的原因之一是第二辐射常数 C_2 的改值(由1948年的1.4380变为1968年的1.4388),而 $C_2 = \frac{Nhc}{R_0}$, (N 为阿伏加德罗数, h 为普朗克常数, R_0 为气体常数, c 为光速),也与光速 c 的数值有关。

c 在基本物理常数的相互联系中也是一个很关键的常数,很多常数的联系公式中都含有 c , c 的准确测定必然会对许多其他常数产生影响。

从光速的精密测量对于物理学和计量学的重大作用,可以看到物理学与计量学存在着十分密切的相互促进的辩证关系。

参 考 文 献

- [1] B. N. Taylor, W. H. Parker and D. N. Langenberg, *Rev. Mod. Phys.*, **41** (1969), 375.
- [2] K. M. Evenson, et al., *Phys. Rev. Letters*, **29** (1972), 1346.
- [3] A. Javan, E. A. Ballik and W. L. Bond, *J. Opt. Soc. Amer.*, **52** (1962), 96.
- [4] W. R. C. Rowley and D. C. Wilson, *Nature*, **206** (1963), 745.
- [5] K. Shimoda and A. Javan, *J. Appl. Phys.*, **36** (1965), 718.
- [6] K. D. Mielenz, et al., *Appl. Opt.*, **7** (1968), 289.
- [7] R. L. Barger and J. L. Hall, *Phys. Rev. Letters*, **22** (1969), 4.
- [8] С. Н. Бараев, Е. В. Бакланов, В. П. Чаботаев, *ЖЭТФ*, том 16, вып. 6 (1972), 344.
- [9] Procès-Verbaux des Séances du Comité International des Poids et Mesures, 59, reunion-1970, p. 113—124.
- [10] Procès-Verbaux des Plances du CIPM 59^e Session-1970.
- [11] K. M. Evenson, J. S. Wells and L. M. Matarrese, *Appl. Phys. Letters*, **16** (1970), 251.
- [12] K. M. Evenson, G. W. Day, J. S. Wells and L. O. Mullen, *Appl. Phys. Letters*, **20** (1972), 133.
- [13] Z. Bay, G. G. Luther and J. A. White, *Phys. Rev. Letters*, **29** (1972), 189.

校后加注:

文中所用的美国标准局测出的3.39微米甲烷稳定氮氛激光的波长值 $\lambda = 3.392\ 231\ 376$ 微米,是用目前的长度基准氩谱线的重心线作为定义而定出的值。如果以氩谱线的最大光强点为定义则得 $\lambda = 3.392\ 231\ 404$ 微米,因而光速值也会有相应的变化。1973年6月12日国际权度局米咨询委员会推荐的3.39微米的波长、频率和光速值为: $\lambda = 3\ 392\ 231 \cdot 40 \times 10^{-12}$ 米,

$$\nu = 88\ 376\ 181\ 627 \text{ 千赫,}$$

$$C = \lambda\nu = 299\ 792\ 458 \text{ 米/秒.}$$

这表明推荐值是采用了氩谱线的最大光强点定义。