

文章编号:1002-6061 (2002)01-0007-04

633 nm 碘稳定激光器 作为长度基(标)准的比对测量

沈乃澄¹, 张志权²

(1. 计量测试高技术联合实验室, 北京 100013; 2. 中国航空长城计量测试技术研究所, 北京 100095)

摘 要: 简述作为长度基(标)准用的 633 nm 碘稳定激光器的技术指标以及它的测量方法, 文中以作者所进行的国际和国内比对中的测量结果为例, 给出了这类激光器可以复现的频率或波长不确定度。

关键词: 碘稳定激光器; 米定义; 频率链

中国分类号: TB921; TN248 **文献标识码:** A

Comparison Measurement of 633nm Iodine-stabilized Laser as a Length Primary Standard(Standard)

Shen Nai-cheng, Zhang Zhi-quan

Abstract: The performance index and its measuring method of the Iodine-stabilized 633nm He-Ne laser as the length primary standard (standard) are described briefly in this paper. Taking the comparison measurement results done by authors home and abroad as an example, the uncertainty of frequency or wave-length of this kind of lasers is shown to be reproducibility.

Key words: iodine-stabilized laser; definition of meter; frequency link

1 长度单位米的定义及其复现方法

长度单位是七个计量基本单位之一, 它的定义曾经历了三次变迁。1889 年, 首次进行的定义, 是用放在巴黎国际计量局的铂铱米尺的两条刻线间的距离作为米的定义, 其不确定度约为 1×10^{-7} ; 1960 年, 改用氪 86 同位素发射的橙黄谱线波长的 1650 763. 73 倍作为米的定义, 其不确定度可达 4×10^{-9} ; 1983 年, 米的定义发生了根本性的变化, 其定义改为“米是光在真空中在 $1/299792458$ 秒的时间间隔的行程”。这个定义在实验室内的复现方法, 是用激光谱线的频率或真空波长值来实现的。自 1983 年以来, 国际计量委员会曾于 1983 年、1992 年和 1997 年三次发表了激光谱线的频率和相应的真空波长值的国际推荐值。三次发表的谱线类别分别为五种、八种和十二种^[1]。从 1997 年发表的十二种谱线的波长范围来看, 它已从 $10.3 \mu\text{m}$ 至 243 nm , 即从中红外波段直至紫外波段很宽的

波长范围。十二种谱线频率或波长的不确定度也不尽相同, 分别达到 10^{-10} 至 10^{-13} 量级。

2 作为复现米定义的实用长度基准装置

复现第一次米定义的长度基准装置是铂铱米尺。复现第二次米定义的长度基准装置是氪 86 同位素光谱灯; 复现第三次米定义的长度基准究竟是什么装置, 这是大家所关心的问题。对此, 国际文件并未作出明确的规定, 即并未针对十二种谱线中任何一种, 作出倾向性的推荐。但是, 就二十余年来的实际情况而言, 各国的实用长度基准装置大多采用 633 nm 碘稳定氦氖激光器。

为什么各国的实用长度基准多采用它, 大致有如下一些原因:

1) 在精密测量和工业测量中使用最为广泛的激光频标或波长标准, 是采用波长为 633 nm 的稳频氦氖激光器, 例如: 兰姆凹陷稳频激光

器、双频激光器、横向塞曼稳频激光器、双纵模稳频激光器等等。它们的频率稳定度可达 10^{-10} 量级,个别可达 10^{-11} 量级,其频率复现性大致在 1×10^{-7} 至 1×10^{-8} 之间,它们的真空波长值及测量不确定度必须用高一级的基准来进行测量。633 nm 碘稳定激光器的频率稳定度可达 $10^{-11} \sim 10^{-12}$ 量级,频率复现性可达 $(1 \sim 2) \times 10^{-11}$,频率或波长值的不确定度为 2.5×10^{-11} ,完全可以用来作为基准,测量上述稳频氦氖激光器的频率稳定度、复现性和真空波长值。

2) 633 nm 碘稳定氦氖激光器装置紧凑,为腔内饱和吸收的稳频激光装置,激光器的腔长约 350 mm,装置便于携带,因此易于广泛开展国际和国内的比对测量。二十余年,各国和各地区同类装置的比对测量已达数百余次。比对结果表明,它们的频率复现性在多数情况下可以优于 2.5×10^{-11} 。

3) 1992 年,法国时间频率基准实验室(LPTF)用激光频率链的方法,直接测量了 633 nm 碘稳定激光器碘谱线 i 分量的绝对频率值,其频率 f_i 和真空波长值 λ_i 分别为

$$f_i = 473612214705 \quad \text{kHz}$$

$$\lambda_i = 632991398.22 \quad \text{fm}$$

其相对不确定度为 2.5×10^{-11} 。

3 633 nm 碘稳定激光器的比对测量方法

633 nm 碘稳定激光器是该频率(波长)领域的最高基准装置,对于它的技术指标测量,通常采用两台同类装置之间的差频比对的测量方法。两台激光器在实现频率稳定后,将其输出的激光光束用全反射镜 M1 和半透半反射镜 M2,调整至光路重合,然后进入雪崩光电二极管,经光电转换和宽带放大后,进入频谱分析仪观测,信号达 40 dB 以上后,分一路至频率计数器作计数测量(见图 1)。

该激光器可稳定在七个碘吸收分量上,按国际上使用的标准符号为 d, e, f, g 和 h, i, j, 其中 i 分量为国际推荐的标准值,其他分量可按国际上推荐的标准频差值进行递推。

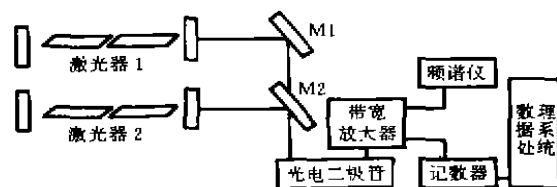


图 1

首先要测量的技术参量是频率稳定度,它可用阿仑方差表示,其定义为

$$\sigma_y^2(2, \tau) = \frac{1}{2(m-1)} \sum_{k=1}^{m-1} (y_{k+1} - y_k)^2 \quad (1)$$

式中: τ 为取样时间,例如测量时可取 $\tau = 1$ s 或 10 s; m 为取样个数,可取 $m = 20$ 或 30; y_{k+1} 和 y_k 是取样的相邻两个频率值; σ_y^2 为测量的阿仑方差值。将 σ_y^2 开方后得到的 σ_y , 就用于表示被测激光的频率稳定度。对于 633 nm 碘稳定氦氖激光器而言, σ_y 的绝对值通常在 5 kHz 至 10 kHz 的量级,将此绝对值除以激光频率值 473 THz, 则可得 $(\sigma_y/f)/\sqrt{2} \approx n \times 10^{-11}$ 量级。我们将 σ_y/f 称之为相对频率稳定度, 分母上的 $\sqrt{2}$ 是将测量的频率稳定度合理地分配到每台被测激光器之上。

其次要测量的技术参量是频率复现性,它表征着激光频率在测量期间内可能的变化范围,通常采用多次测量的平均值来表示。例如,我们用 d, e, f, g 四个分量进行的拍频测量值,其国际推荐的标准值为

$$f_{d-e} = 12.861 \text{ MHz} \quad (2)$$

$$f_{e-f} = 13.363 \text{ MHz} \quad (3)$$

$$f_{f-g} = 13.198 \text{ MHz} \quad (4)$$

在测量中,如在规范条件下(碘室温度为 15°C,调制频率为 6 MHz,腔内功率约在 5~10 mW,两台激光器之间测量的频差偏离(2)~(4)式的数值,即为两台激光器之间的频差。例如, $f_{d-e} = 12.861 \text{ MHz}$, $f_{e-d} = 12.871 \text{ MHz}$, 则两者之间的频差即为 10 kHz,再通过其他分量之间的频差测量,可以得到总的平均频差值,并同时获得测量系列的均方误差。两者之间的测量频差是

频率复现性的标志,均方误差为复现性的测量不确定度。

4 633 nm 碘稳定激光器国际和国内比对

作为测量实例,向读者介绍作者已进行的国际比对和国内比对的实测结果。

第一次比对是在中国计量科学研究院(NIM)与BIPM的激光器之间进行的,测量结果如下:

频率稳定度 2×10^{-11} (1 s), 6×10^{-12} (10 s), 6×10^{-13} (2700 s)

平均频差 2.9×10^{-11}

测量不确定度 0.95×10^{-11}

第二次比对是在五个实验室(BIPM, NIM, MIKES, CMI 和 VNIM)之间进行的,后两个实验室的全称是:捷克计量研究所和俄罗斯门捷列夫计量研究所。在这次比对中,先采用国际上通常使用的三次谐波锁定方法(简称THT),然后再采用最近在五个实验室中采用的五次谐波锁定方法(简称FHT)。两者的区别是:当调制频率为 f 时,THT的解调频率为 $3f$,FHT的解调频率为 $5f$ 。因篇幅所限,在此仅介绍我国与BIPM的比对结果及五个实验室的总平均值。

频率稳定度 2×10^{-11} (1 s), 10^{-12} (10 s), 2.6×10^{-13} (2000 s)

平均频差 2.4×10^{-11} (THT), -3.5×10^{-11} (FHT)

总平均频差 6.6×10^{-11} (THT), 2.6×10^{-11} (FHT)

测量不确定度 2.8×10^{-11} (THT), 1.5×10^{-11} (FHT)

2) 国内比对测量

2001年7月,本文两位作者各用本单位的激光器(304所的国家副基准和经过国际比对的碘稳定激光器)进行过一次国内比对测量,测量结果如下:

频率稳定度 2×10^{-11} (1 s), 6×10^{-12} (10 s)

平均频差 1.5×10^{-11}

测量不确定度 2×10^{-11}

波长不确定度 5×10^{-11}

1987年至2001年304所的国家副基准与计量院的国家基准曾进行过八次比对测量,比对测量结果如下:

1987年10月 频率稳定度 2.5×10^{-11} (1 s), 8.5×10^{-12} (10 s)

两峰间频差 $\pm 4 \times 10^{-11}$

1989年10月 频率稳定度 1.0×10^{-11} (10 s) 复现性 3.9×10^{-11}

1991年10月 频率稳定度 2.4×10^{-11} (10 s) 复现性 4.0×10^{-11}

1993年10月 频率稳定度 3.0×10^{-11} (10 s) 复现性 3.9×10^{-11}

1995年8月 频率稳定度 2.0×10^{-11} (10 s) 复现性 3.9×10^{-11}

1997年10月 频率稳定度 4.9×10^{-11} (1 s), 1.6×10^{-11} (10 s), 4.0×10^{-12} (100 s)

1999年5月 频率稳定度 3.7×10^{-11} (1 s), 1.2×10^{-11} (10 s), 3.1×10^{-12} (100 s)

2001年2月 频率稳定度 5.8×10^{-11} (1 s), 2.2×10^{-11} (10 s), 5.7×10^{-12} (100 s), 6.4×10^{-12} (1000 s)

从多年的比对测量可以看出633 nm波长副基准1 s取样时的频率稳定度为 $(2.5 \sim 5) \times 10^{-11}$,10 s取样时的相应值在 $2.2 \times 10^{-11} \sim 4 \times 10^{-12}$ 之间,100 s取样时则为 $(4 \sim 5) \times 10^{-12}$ 。平均频差:1987年至1993年测量的平均频差约为 4×10^{-11} ,2001年7月测量的平均频差小于 2.5×10^{-11} 。测量不确定度约为 2×10^{-11} 。波长不确定度为 5×10^{-11} 。

5 分析与讨论

633 nm 碘稳定氦氖激光器是将激光频率稳定在碘饱和吸收谱线的超精细分量上,每个碘吸收分量的谱线宽度约为4 MHz。在实现频率稳定时,可以将激光频率锁定在碘谱线宽度的几千分之一以内,比对频率的变化量约为

(下转第34页)

$$\Delta H_{\max} = 2.3 \times 0.1 = 0.23 \text{ m}$$

由此可见,因时统引起的误差当采用GPS授时时可以忽略不计。

当用计算机内时间时,因误差超过0.1s的点很少,所以其测量误差也能满足要求。

4.4 误差合成

将上述三项误差合成后根据公式计算出总误差为0.12m。由此可见,用全站仪测量直升机的悬停性能,其精度是可以满足要求的。

5 结论

1)用全站仪进行直升机悬停高度的测试,其理论严密,方案合理,操作简单。两年来我们已在三种型号的直升机悬停性能试飞中采用,均获得成功。

2)与原始的摄影测量法相比,具有不需要飞机加改装、机场做地标、胶片冲洗与判读等繁

重劳动,省时省力,大大提高了工作效率。

3)具有数据实时处理,测量精度高的优点。

4)系统重量轻,体积小,布站方便,简单快捷,便于携带,特别适合于外出转场试飞。

在此基础上如进一步加装CCD摄像头,将视频信号以每秒25帧的速度采集至计算机内,利用数字图像处理技术,事后进行脱靶量的判读和修正可使测量精度大大提高。

6)采用自动跟踪型全站仪可以将脱靶量误差降到最小,同时可以进一步扩展全站仪在直升机试飞领域中的用途,如直升机的侧飞、自转着陆以及决策速度等课目。

收稿日期:2001-03-19;修回日期:2001-10-30

作者简介:解伟群(1956-),男,工程师,毕业于空军工程学院,现从事光电测试工作。

(上接第9页)

5 kHz,即约为 1×10^{-11} 量级。在第三节所述的规范条件下,由于物理原因产生的各种频移可控制在10 kHz范围内,因此其复现性可达 $\pm 2.5 \times 10^{-11}$ 。

由此可见,633 nm 碘稳定氦氖激光器只要满足规范条件,并实现可靠的频率稳定,无论作为国家长度基准使用,还是作为地区或部门的长度副基准使用,或者在高等院校或研究所作为实验中的频率标准使用,其1s取样的频率稳定度均可达 2×10^{-11} ,10s或100s取样的频率稳定度可按 $1/\sqrt{\tau}$ 类推,其中 τ 为取样时间。以测量频差为标志的频率复现性,在较好的情况下可达 2.5×10^{-11} ,即使在稍差的情况也能达到 10^{-10} ,因此633 nm 碘稳定激光可作基准对633 nm 波长段的激光进行测量及量值传递并用来复现米定义。

参考文献

- 1 Quinn T J. Mise en Pratique of the Definition of the Metre(1992). Metrologia, 1993/94, (30)523~541
- 2 Lassila A, Riski K, Hu J, Ahola T, Shen Naicheng, Li chengying, Balling P, Blab la J, Abramava L, Zakharenko Yu. G, Fedorin V L, Chartier A and Chartier J M. International comparison of He-Ne Laser stabilized with ^{127}I at $\lambda \approx 633 \text{ nm}$ Comparison of the fifth and third harmonic locking techniques. Metrologia, 2000, (37)701~707
- 3 沈乃澄,李成阳等.甲烷稳定和碘稳定激光的国际比对.计量学报,1981, (4)140~145

收稿日期:2001-09-18

作者简介:沈乃澄(1938-),研究员,主要从事光频及光波计量研究。

张志权(1953-),高级工程师,主要从事光波及几何量计量。

通讯地址:北京市1066信箱6分箱,100095