

633nm 激光波长基准/副基准 比对报告

中国计量科学研究院（100013）

中国测试技术研究院（610021）

中国第一航空集团公司第 304 研究所（100095）

2007.3.23 北京

1 概述

1983 年，国际计量委员会（CIPM）推荐将碘稳定的 633nm He-Ne 激光辐射波长作为复现米定义的标准[1]。此后，根据国际上各实验室的研究和测量结果，1992 年 CIPM 更严格地规定了激光系统的运行条件和主要技术参数，同时重新给出了其频率值、波长值及其不确定度标准[2]。在此基础上，2001 年，CIPM 向世界各国推荐了现行的技术参数和运行条件[3]。

长度单位米是 SI 单位制中 7 个基本单位之一，也是较早以自然基准的方式复现的基本单位之一。在国际计量组织推荐的复现米定义的若干标准谱线中，碘稳定的 633nm 激光波长标准是目前世界上实用性最强、影响面最大、应用面最广、最受重视的长度基准。碘稳定激光系统的制作工艺特殊，装置组成较为复杂，即使是基本满足 CIPM 推荐的技术参数和运行条件，也不能完全保证达到国际频率（波长）值的不确定度标准。所以，不同国家的基准装置之间需要定期进行比对实验，确定不同装置间的系统偏差以及造成偏差的技术原因，以保证国际间的长度量值的准确和统一。

自 1983 年新米定义实施以来，在世界范围内，围绕 633nm 激光波长基准装置的复现数据，在国际计量局和地区计量组织的倡导和组织下，各国或地区之间已经进行了无数次的多边或双边比对。通过比对实验，一方面保证了各国或地区之间的长度量值的准确和统一，为世界各国的工业标准化进程提供了有力的技术保障；另一方面也极大地促进了参加比对的国家和地区的计量技术水平的提高。在过去 20 多年的时间里，中国计量科学研究院就曾经代表中国多次参加这种比对实验。通过比对，不仅对外展示了中国长度计量基准的技术水平，而且利用比对期间与国外同行面对面的技术交流机会，促进了国内长度基准装置技术水平的提高。

中国是较早开展碘稳定 633nm He-Ne 激光波长基准装置研究和应用的国家之一。经过近 30 年的不懈努力，不仅研制并建立了波长基标准装置系列，而且大体上完成了长度量值溯源体系的基本建设。这些工作的开展为中国的国民经济建设和产品质量的控制奠定了技术保障基础。可以毫不夸张的说，这一切源自于 633nm 波长基准装置的建立。目前我国现行有效的 633nm 国家长度基准和副基准装置共有 3 套，其中基准装置保存在中国计量科学研究院，副基准装置分别保存在中国测试技术研究院和中国航空工业第一集团公司北京长城计量测试技术研究所。3 套装置的运行条件和相关的参数指标都应满足国际计量组织规定的技术要求，并且各自在不同的领域和地域履行长度量值溯源的职责。国家长度基准和副基准，担负着统一全国长度量值的大任，因此定期比对不仅是必要的，而且是必须的。然而，由于种种原因，自 1983 年新米定义开始实施以来，在三家单位的基准或副基准装置之间，从未进行过正式的比对实验，成为国内长度量值溯源体系建设和实施过程中的一大缺憾，势必危及长度量值的准确和统一。针对这种情况，受国家质量监督检验检疫总局的委托，中国计量科学研究院于 2006 年在国内组织了 633nm $^{127}\text{I}_2$ 稳定激光波长基准、副基准的比对工作。比对实验的负责单位是全国几何量长度委员会，主导实验室是中国计量科学研究院。参加比对实验单位的相关信息见表 1。

表 1 比对实验单位的相关信息

基准或副基准保管单位	联系人	地址
中国计量科学研究院（以下简称计量院）/基准	钱进	电话：010-64211631-3320 传真：010-64211631-3320 电子信箱：qianjin1000@yahoo.com.cn 通信地址：北京北三环东路 18 号 邮政编码：100013
中国测试技术研究院（以下简称测试院）/副基准	黄晓荣	电话：028-84404885 传真：028-84404885 电子信箱： 通信地址：成都市玉双路 10 号 邮政编码：610021
中国航空工业第一集团公司北京长城计量测试技术研究所（以下简称 304 所）/副基准	张志权	电话：010-62457119 传真：010-62462965 电子：zhangzhiquan0112@sina.com.cn 通信地址：北京 1066 信箱 6 分箱 邮政编码：100095

表 1 中的三个单位，共有四套装置参加了比对实验。其中计量院两套，测试院和 304 所各一套。由于装置技术条件和实验室环境条件的限制，比对实验在北京和成都分三次进行。比对时间等信息见表 2。

表 2 比对时间和地点安排

实验序号	基准装置编号	所属单位	比对时间	比对地点
1	D1/NO.02	计量院/304 所	06.03.02 -03.09	计量院
2	D1/C4	计量院/计量院	06.11.08 -11.14	计量院
3	C4/NIMTT-1	计量院/测试院	06.12.14-12.18	测试院

2. 实验条件

在此次实验中，参加比对的所有基准装置均采用三次谐波（以下简称 3f）锁定技术将激光频率稳定到 $^{127}\text{I}_2$ 分子吸收谱线的 11-5 带 R(127) 的超精细结构吸收分量上。按照要求，有关参数和运行条件应与 CIPM 所推荐的条件相一致，即

碘吸收室室壁温度 $(25 \pm 5) ^\circ\text{C}$

碘吸收室冷指温度 $(15.0 \pm 0.2) ^\circ\text{C}$

频率调制宽度（峰-峰值） $(6.0 \pm 0.3) \text{ MHz}$

谐振腔内单程光束的光功率 $(10 \pm 5) \text{ mW}$

实际情况是，由于比对实验中基准装置（以下简称激光系统）建立的年代和研制的单位不同，它们在相关技术参数和组成的细节方面存在较大差异，其中的一些技术参数与上述要求有一定出入。为了使实验能够顺利进行，比对实验在实施过程中采取了比较灵活的做法。表 3 中列出了这些激光系统的主要工作参数。

表 3 激光系统的主要工作参数

单位	激光系统	腔长/mm	腔镜曲率半径及透过率				碘室		调制频率/kHz
			mm	%	mm*	%*	长度/mm	气压/Pa	
计量院	D1	300	500	0.5	1000	1.3	100	400	1.04
计量院	C4	260	600	1.1	∞	1.8	90	400	1.04
304 所	NO.02	230	600	0.4	∞	1.2	90	400	1.04
测试院	NIMTT-1	365	—	—	—	—	110	—	0.406

*为碘室一侧的反射镜的参数

3. 测量原理和测量方法

当参考激光和被测激光的频率相近、两束光波前重合，且彼此间光的振动方向不完全垂直时，即形成拍。对两束光的频率差进行的测量，得到的频率值即是拍频值。其中，三次比对实验中的参考激光分别为 D1 和 C4，辐射激光的频率值由国际比对确定，由此可以得到被测激光的频率值。

测量实验的原理和装置如图 1 所示。激光波长拍频测量系统主要由相应的光学元器件、宽带前置光电放大器、频率计数器、频谱分析仪以及计算机软硬件等组成。其频率响应范围： $0.1 \text{ MHz} < f < 1.5 \text{ GHz}$ ，能够完成激光频率的阿伦方差和对应真空波长的测量等功能。

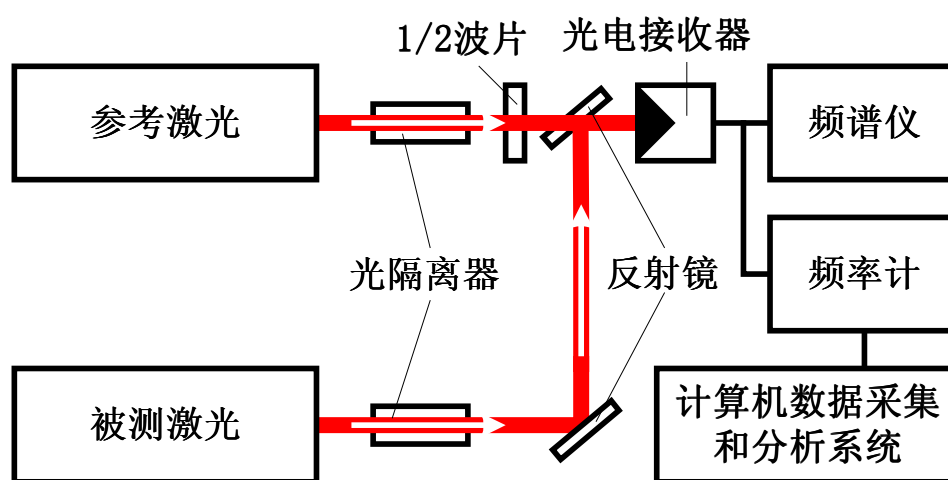


图 1. 拍频测量原理

4. 实验内容

4.1 频率稳定度测量

参照图 1 所示测量原理，对激光系统进行了频率稳定度测量实验。由于每次频率稳定度测量需要 3 小时以上，所以这项实验安排在中午或晚上进行。

测量结果分别用取样时间为 0.1s、1s、10s、100s 和 1000s 的阿伦方差表示。

4.2 频差测量

对 $^{127}\text{I}_2$ 分子吸收谱线的 11-5 带 R(127) 的超精细结构吸收分量，有关国际组织共推荐了 20 条谱线，其中常用的是 *d*、*e*、*f*、*g*、*h*、*i*、*j* 七个分量，此次比对只涉及其中的前四个分量。为了得到每两个激光系统之间的平均频差值和它的变化情况，采取 4 阶矩阵测量的方式。

$$\begin{array}{cccc}
M_{dd} & M_{de} & M_{df} & M_{dg} \\
M_{ed} & M_{ee} & M_{ef} & M_{eg} \\
M_{fd} & M_{fe} & M_{ff} & M_{fg} \\
M_{gd} & M_{ge} & M_{gf} & M_{gg}
\end{array}$$

图 2. 被测量的矩阵元素示意图

测量矩阵如图 2 所示。每个矩阵元代表两个激光系统不同分量之间的频差。依据矩阵中各元素的排列顺序，依次将参与拍频的激光系统的频率锁定在对应的吸收峰上。测量时，每个拍频测量值读数的取样时间为 10 秒，取五次读数的平均值作为一个矩阵元，由此直到求得每个矩阵元。测量中为了避免零拍现象，位于主对角线上的元素 M_{dd} 、 M_{ee} 、 M_{ff} 、 M_{gg} 不在所测之列。根据矩阵元的测量结果，由公式 (1) 可求得两个激光系统之间的平均频差值为

$$\overline{\Delta f} = \frac{1}{12} \sum_{i=d}^g \sum_{j=d}^g M_{ij} \quad (1)$$

式中，当 $i = j$ 时，令 $M_{ij} = 0$ ；其标准偏差可由贝塞尔公式得到。

4.3 实验安排

比对实验共计为 15 天，先后在北京和成都完成。D1 与 C4 和 NO.02 的比对在北京中国计量科学研究院进行，C4 和 NIMTT-1 的比对在成都中国测试技术研究院进行。分别以 D1 和 C4 作为参考激光，NO. 02 和 NIMTT-1 作为被测激光。比对过程中，除了对相关激光系统的频率稳定性和平均频差进行测量外，还对影响光频绝对值的功率位移和调制位移参数进行了测量实验。其中每两个激光系统之间的平均频差测量每天完成 2 组，上、下午各进行一次。

作为参考激光的 D1，其光频的绝对值源于 BIPM 组织的国际比对[4]。

5. 比对结果

5.1 频率稳定度

稳定激光的频率稳定度用阿伦方差进行评估。阿伦方差的数学表达式如下：

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{4nf^2} \sum_{i=0}^{n-1} (\Delta f_{i+1} - \Delta f_i)^2} \quad (2)$$

- 式中： σ —— 相对频率稳定度；
 n —— 总的测量次数；
 f —— 在测量时间内的平均频率；
 Δf_i —— 一定采样时间内，两台比对激光在第 i 次测量时的平均频差。

根据拍频测量的实验数据，分别选取采样时间为 0.1 秒、1 秒、10 秒、100 秒和 1000 秒，得到的不同采样时间的频率稳定度测量结果见表 4。

表 4 不同采样时间的频率稳定度测量结果

激光系统	0.1s	1s	10s	100s	1000s
D1/C4	2.7×10^{-11}	7.7×10^{-12}	2.4×10^{-12}	7.8×10^{-13}	2.5×10^{-13}
D1/NO.02	3.3×10^{-11}	1.1×10^{-11}	3.4×10^{-12}	1.1×10^{-12}	3.6×10^{-13}
C4/NIMTT-1	2.2×10^{-10}	4.2×10^{-11}	1.2×10^{-11}	4.9×10^{-12}	2.5×10^{-12}

5.2 位移参数测量

对于一个碘稳定的 He-Ne 激光系统而言，激光频率的调制宽度、碘室的冷指温度以及腔内单程功率的改变都会引起输出激光频率的变化。这三个参数分别被称为调制位移参数、温度位移参数和功率位移参数。位移参数的测量实验就是为了确定这些参数而设置的。本次比对未进行温度位移参数的测量实验。

位移参数的测量原理及基本过程与平均频差测量类似。不同的是，在测量过程中需要通过相关参数的改变，得到被测激光的频率变化。将二者的变化量进行比较，就可确定该位移参数。

以调制位移参数测量为例，按图 1 所示原理调整光路，其中激光系统 A 作为参考激光，激光系统 B 作为被测激光。前者的各项参数固定不变，依次选择后者的调制宽度为 4MHz、5MHz、6MHz、7MHz 和 8MHz，按照与上述频差测量完全相同方法和步骤，得到对应于不同调制宽度的平均频差。将频差的变化量与调制宽度的变化量进行比较，最终得到被测激光系统的调制位移参数。测量结

果见表 5。

表 5 激光系统位移参数

激光系统 位移参数	D1	C4	NO.02	NIMTT-1
温度位移(kHz/K)	-11.39	—	—	—
调制位移(kHz/MHz _{p-p})	-8.55	-8.89	-7.4	—
功率位移(kHz/ μ W)	-0.20	-0.15	-0.10	—

因为 NIMTT-1 的调制信号宽度和冷指温度均不可调并且输出激光功率只有 15 μ W，未对其进行上述位移参数的测量。

5.3 激光系统间的平均频差及其标准偏差

为了考察激光系统的光频复现性，频差测量实验连续进行 5 天。由于 NIMTT-1 激光输出功率偏小，系统锁定困难，实验中其调制信号宽度设定为 10MHz 左右。并且，由于该激光系统的碘室冷指的控温环节采用被动控温的方式，温度变化范围较大，与国际推荐条件有一定出入。除此之外，其他激光系统的运行条件均符合国际推荐条件的要求。测量结果见表 6。

表 6 激光系统之间的平均频差 ($f_A - f_B$) 及其标准偏差 σ 单位 kHz

$f_A - f_B$	D1 (A)	NIMTT-1 (A)
C4(B)	-7.4 $\sigma = 1.7$	11.3 $\sigma = 4.6$
NO.02(B)	-4.8 $\sigma = 1.6$	---- ----

表中所列平均频差及其标准偏差结果由 10 组实验数据的平均值得到。表中数据栏的第 1 行为平均频差值（单位 kHz）；第 2 行为平均频差的标准偏差（单位 kHz）。

根据 D1 与国际计量局的飞秒光梳装置 BIPMC1 得到绝对频率比推荐值低 8.9kHz 的频差关系[4]，得出各个激光系统与国际计量局比推荐值的频差值结果表 7 所示。

表 7 各激光系统频差的最终比对结果

激光器	D1	C4	NO.02	NIMTT-1
$\Delta f = \text{测量结果} - \text{推荐值}$	-8.9kHz	-1.5kHz	-4.1 kHz	+9.8kHz
σ	1.9 kHz	1.7 kHz	1.6 kHz	4.6 kHz

6. 结论

在 15 天内，共进行了 30 次平均频差的测量实验。图 3 是根据平均频差测量的原始数据绘制的折线图，横坐标表示测量实验先后顺序的序列号，纵坐标为激光系统输出激光频率与国际推荐频率值的差值。

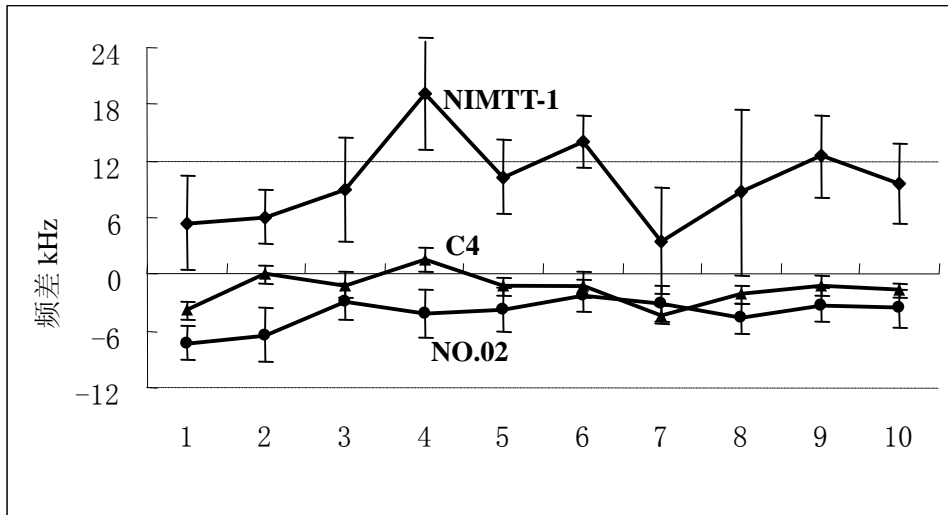


图 3. 以国际推荐值为参考，各激光系统输出激光频率的测量结果。因 D1 输出激光的频率值直接溯源于国际计量局，图中未列出。

图 3 显示，参加比对的激光系统，C4 和 NO.02，其输出激光频率的变化范围在 2.5×10^{-11} 之内。在多数情况下，激光系统 NIMTT-1 也能满足此项要求。

由比对结果，各装置激光辐射平均频率相对国际推荐值的分布如图 4 所示。目前，被测激光器最高相对扩展不确定度为 5×10^{-10} ($k=2$) [5]。因此，现有的国家长度基准、副基准装置在量值的准确度方面，可以胜任统一全国长度量值的工作。

相比较而言，NIMTT-1 无论是在单次测量的发散性上，还是在不同天数的测

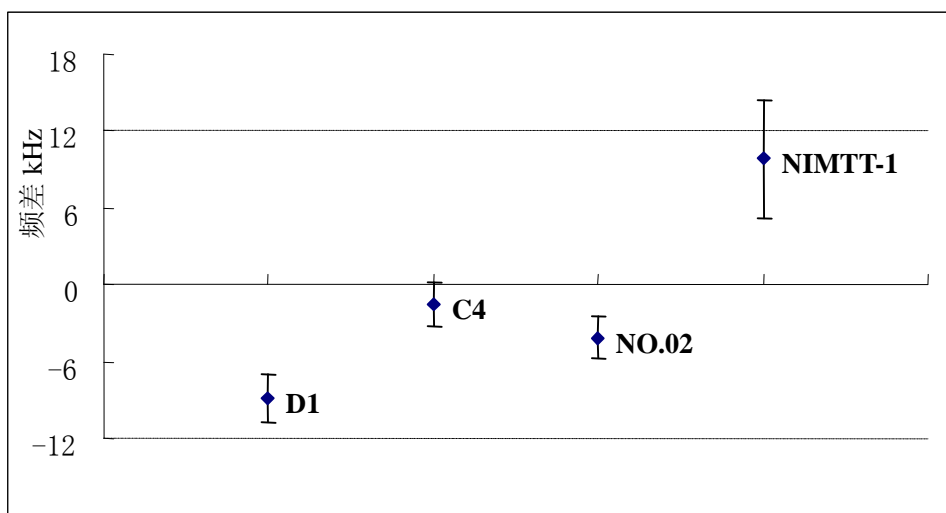


图 4. 各激光系统相对国际推荐值的比对结果

量数据的变化量上都比其它激光系统测量结果的不确定性大得多。这在一定程度上反映了该系统存在的问题。事实上，由于 NIMTT-1 的若干技术参数，比如，输出激光功率、冷指温度和调制宽度等在比对实验中不能得到有效控制，出现上述情况也是十分正常的。综上所述，NIMTT-1 与其它参加比对的激光系统在技术性能上存在的差距比较突出，这种差距从表 4 中所示的频率稳定度的测量结果也能明显看到。

7. 感谢

此次比对实验从准备到完成历时一年，达到了预期目标。其间得到了各部门领导和同志们以及全国几何量长度计量技术委员会的大力支持，同时，在很多方面也得到了参加比对单位领导的帮助和关心，在此谨表谢意。

参考文献：

- [1] Documents Concerning the New Definition of the Meter, Metrologia, 19 (1984) 163.
- [2] Mise en Pratique of the Definition of the Metre (1992) Metrologia, 30 (1994) 523.
- [3] Practical realization of the definition of the metre, including recommended radiations of other optical frequency standards (2001) Metrologia, 40 (2003) 103.
- [4] N° 11-2005 Calibration Certificate, BUREAU INTERNATIONAL DES POID (BIPM 校准证书)

[5] 钱进 刘秀英 石春英 中华人民共和国国家计量检定规程 JJG 353—2006 《633nm 稳频激光器》