

中华人民共和国国家计量技术规范

JJF ××××—202X

稳频激光器校准规范

Calibration Specification of Frequency Stabilized Laser

(征求意见稿)

202X - XX - XX 发布

202X - XX - XX 实施

国家市场监督管理总局 发布

稳频激光器校准规范

Calibration Specification of Frequency Stabilized Laser

JJF ××××—202X

代替 JJG353—2006

归口单位：全国几何量长度计量技术委员会

主要起草单位：中国计量科学研究院

本规范委托全国几何量长度计量技术委员会负责解释

本规范起草人：

目 录

引 言	III
1 范围	1
2 引用文件	1
3 术语和计量单位	1
3.1 波长标准激光器 wavelength standard laser	1
3.2 真空波长 wavelength in vacuum	1
3.3 外差法 heterodyne method	1
3.4 拍频 optical frequency beating	1
3.5 光频梳 optical frequency comb	2
3.6 梳齿频率 frequency of comb tooth	2
3.7 模数 mode number	2
3.8 重复频率 repetition rate	2
3.9 载波包络相移 carrier-enveloped phase shift	2
4 概述	2
5 计量特性	2
6 校准条件	2
6.1 环境条件	2
6.2 测量标准及其他设备	3
7 校准项目和校准方法	3
7.1 真空波长值	4
7.1.1 以高稳定度激光为参考光	4
7.1.2 以光频梳为参考光源	5
7.2 相对频率稳定度	6
8 校准结果表达	7
9 复校时间间隔	8
附录 A 校准记录内容	9

附录 B	校准证书内页内容	13
附录 C	测量不确定度评定示例	14

引 言

本规范依据 JJF1001《通用计量术语及定义》、JJF1071《国家计量校准规范编写规则》编制，测量不确定度的评定按照 JJF1059.1《测量不确定度评定与表示》进行。

本规范代替 JJG 353-2006《633 nm 稳频激光器》，与 JJG 353-2006 相比，除编辑性修改外，主要技术变化如下：

- 扩大了稳频激光器真空波长值的测量范围；
- 提升了测量不确定度水平；
- 增加了复现性对校准结果的影响；
- 增加了附录 C 激光频率/真空波长的测量不确定度评定示例。

本规范历次版本发布情况为：

- JJG 353-2006。
- JJG 353-1994。
- JJG 353-1984。

稳频激光器校准规范

1 范围

本规范适用于作为激光波长标准光源的稳频激光器的校准。

稳频激光器种类繁多，不确定度水平相差巨大，校准时需根据实际情况选择适当的参考光源。

2 引用文件

本规范引用了下列文件：

JJG 353-2006 633 nm 稳频激光器

ISO 13695-2004 Optics and photonics – Lasers and laser-related equipment – Test methods for the spectral characteristics of lasers

IEC TS 62129-3 Calibration of wavelength/optical frequency measurement instruments Part 3: Optical frequency meters using optical frequency combs

凡是注日期的引用文件，仅注日期的版本适用于本规范；凡是不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本规范。

3 术语和计量单位

3.1 波长标准激光器 wavelength standard laser

采用外差法校准稳频激光真空波长值时，频率不确定度小于或等于 1/3 被校准稳频激光器频率不确定度的高稳定度稳频激光器，均可作为波长标准与被校准稳频激光组成拍频光路。

3.2 真空波长 wavelength in vacuum

在真空中传播的平面电磁波的波长，单位为 nm。

注：频率为 f_0 的波，其真空波长为 $\lambda_0=c/f_0$ ，其中 c 为真空中的光速， $c = 299\,792\,458$ m/s。

3.3 外差法 heterodyne method

一种通过拍频测量光频率的方法。令被校准稳频激光与波长标准激光形成拍频，通过两者的频差计算被校准稳频激光频率的方法。

3.4 拍频 frequency beating

当波长标准激光器和被校准稳频激光器的频率（或真空波长）相近、两束光

波前重合且光场振动方向投影不为零时，即形成拍频。拍的频率为两束激光的频率差。

3.5 光频梳 optical frequency comb

一种工作在特殊模式下的锁模脉冲激光器。其输出光在频域上，由等频率间隔的梳齿构成；在时域上，由等时间间隔的光脉冲构成。

3.6 梳齿频率 frequency of comb tooth

光频梳在频域中的一个纵模的频率，单位为 kHz。

3.7 模数 mode number

光频梳中一个特定纵模在谐振腔中振荡的次数。

3.8 重复频率 repetition rate

脉冲激光器输出脉冲时间间隔的倒数，单位为 kHz。

3.9 载波包络相移 carrier-envelope offset

脉冲激光输出的载波包络相位与光载波之间的相位差，单位为 rad。

4 概述

稳频激光器的主要作用是提供稳定的激光波长参考。稳频激光器是激光干涉测量技术中不可或缺的光源，其波长不确定度决定了干涉测量能达到的最高精度水平。稳频激光器提供的波长值还可以被用于光波长测量类仪器（如光波长计）的校准。

5 计量特性

5.1 真空波长值

测量范围：(237 ~ 2000) nm

5.2 相对频率稳定度

小于 1×10^{-7} ，大于 1×10^{-13}

6 校准条件

6.1 环境条件

仪器使用允许的环境条件，测量过程中应测量和记录环境的温度、湿度。校准用仪器设备应在测量环境中稳定不小于 2 h。

6.2 测量标准及其他设备

根据测量精度的需求和被测波长值选择适当的标准光源和测量仪器。

标准器及技术要求	
标准器具	技术要求
波长标准激光器	国际计量委员会（CIPM）推荐的用于复现 SI 基本单位米的高稳定度稳频激光波长。 光波长测量范围：被测光频率与波长标准激光器频差的绝对值大于 0，且小于 1 GHz。 频率相对标准不确定度：不大于被校准稳频激光频率相对标准不确定度的 1/3，一般为 10^{-10} ~ 10^{-11} 量级。
光频梳	波长测量范围：(500~2000) nm 梳齿相对频率测量不确定度： $\leq 1 \times 10^{-11}$
频率计数器	频率范围：0.001 Hz~1.5 GHz 最小采样频率： ≥ 10 Hz 测量误差： ≤ 1 Hz
频谱分析仪	响应带宽： ≥ 1 GHz
光电探测器	响应带宽： ≥ 1 GHz

7 校准项目和校准方法

稳频激光器的种类很多，包括气体激光器、固体激光器、半导体激光器。稳频激光器的波长种类也很多，在紫外波段、可见光波段和近红外波段都有应用。稳频激光器的波长不确定度水平相差也很大，从 10^{-7} 量级到 10^{-12} 量级，甚至更低。

稳频激光器采用外差法进行校准。即，令被校准稳频激光的输出光束与参考光束重合，形成拍频，通过测量两者之间的频率差，计算得到被测稳频激光的频率值和真空波长值，同时得到被校准激光的频率稳定度。参考光束可以来自波长标准激光器，也可以来自光频梳。

在校准稳频激光器时，应大致了解被校准稳频激光器输出光的波长和不确定度水平，以选择适当的参考光源。参考光源的频率（真空波长）应为已知。参考光源的频率与被校准激光的频差应小于 1 GHz，且不为 0。参考光源的频率标准

不确定度应不大于被校准稳频激光频率标准不确定度的 1/3。

校准稳频激光器时一般首选波长相近的波长标准激光器作为参考光源，当波长标准激光的波长范围或频率不确定度水平无法满足校准需求时，则选择以时间频率信号为参考源的光频梳作为参考光源。

7.1 真空波长值

7.1.1 以波长标准激光器为参考光源

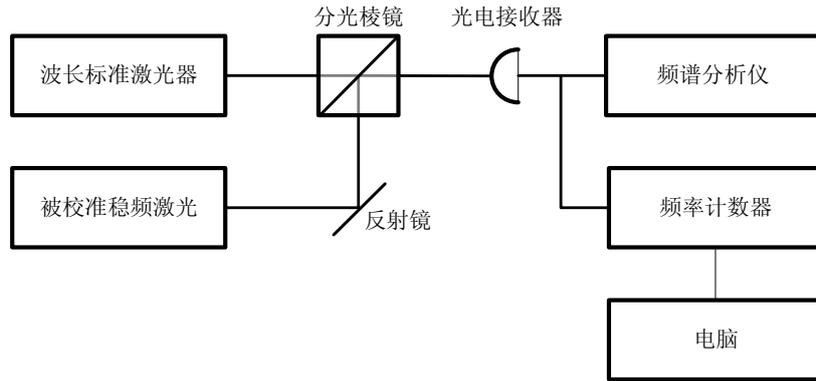


图 1 波长标准激光器校准稳频激光器示意图

按照图 1 搭建拍频测量光路。必要时需要在波长标准激光器和被校准稳频激光器出光口处放置光隔离器（图 1 中未示出），消除光反馈。根据仪器使用要求进行预热。调整被校准稳频激光器和高稳定度激光的输出光束，使两束激光完全重合，调整被校准稳频激光的偏振方向，形成拍频。两束激光产生的频差为 Δf

（避免频差为 0）。光信号经光电接收器转换为电信号，并输入至频谱分析仪和频率计数器。通过频谱分析仪观察拍频信号的信噪比，拍频信号信噪比应大于 30 dB。频率计数器的数据被采集到电脑中。频率计数器的采样时间设置为 0.1 s，连续进行 3 h 测量。计算 3 h 内测量数据的算数平均值，得到平均频差 $\Delta \bar{f}$ 。根据

式(1)计算被校准稳频激光器的平均真空波长值 λ_x 为

$$\lambda_x = \frac{c}{f_x} \times 10^6 = \frac{c}{f_s \pm \Delta \bar{f}} \times 10^6 \quad (1)$$

式中：

λ_x ——被校准稳频激光器真空波长值，nm

c ——真空中的光速，299 792 458 m/s；

f_s ——波长标准激光的频率，kHz；

$\Delta\bar{f}$ ——波长标准激光与被校准稳频激光器的平均频率差，kHz。

7.1.2 以光频梳为参考光源

光频梳在光频率与微波频率之间建立了链接。

锁定光频梳的重复频率和载波相移频率。将可溯源至时间频率基准的微波参考频率输入至光频梳的频率综合器，并确保二者之间的锁定。在锁定控制器上设置光频梳的重复频率和载波相移频率，并调节伺服反馈单元，实现光频梳重复频率和载波相移频率与频率综合器输出频率的锁定。

按照图 2 所示搭建光频梳拍频测量光路。根据被校准稳频激光器的波长选定合适的光学滤波片，使滤波后光频梳的中心波长能够覆盖被校准光源的波长。令光频梳的输出光束与被校准稳频激光器的输出光束重合，形成拍频。合束光入射至衍射光栅，进行分光。用光阑滤除与被校准稳频激光器波长不相关的光束。用光电接收器接收通过光阑的合束光，将拍频信号转换为电信号。

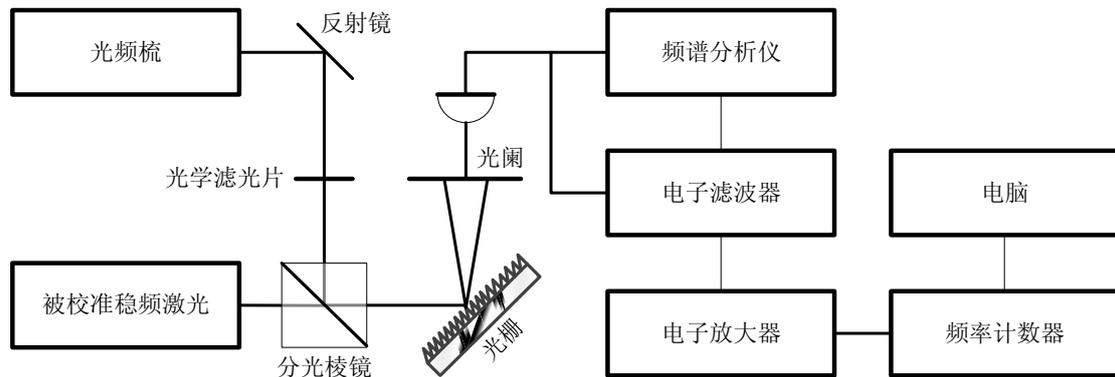


图 2 光频梳拍频测量波长示意图

将拍频信号接入频谱分析仪和频率计数器。观察被校准激光与光频梳梳齿间拍频信号的信噪比，拍频信噪比大于 30 dB。也可同时使用微波放大器对滤除后的拍频信号进行适当放大，使拍频信号的幅度满足频率计数器的输入要求。使用微波电子滤波器滤除拍频信号中光频梳的重复频率信号。用电脑采集频率计数器中的数据。

使用光频梳校准稳频激光器波长时，拍频数据的采集和处理方法与 7.1.1 所述一致。(2)式为通过光频梳校准的稳频激光器的波长表达式，与(1)式具有相同的形式。差别在于(2)式中用光频梳的梳齿频率代替了(1)式中波长标准激光器的

波长。

$$\lambda_x = \frac{c}{f_x} \times 10^6 = \frac{c}{f_s \pm \Delta\bar{f}} \times 10^6 \quad (2)$$

式中：

λ_x ——被校准稳频激光器的真空波长值，nm；

c ——真空中的光速，299 792 458 m/s；

f_x ——被校准稳频激光器的光频率，kHz；

f_s ——与被校准稳频激光形成拍频的光频梳梳齿的频率，kHz；

$\Delta\bar{f}$ ——被校准稳频激光与光频梳梳齿之间拍频的平均频率，kHz；

光频梳梳齿的频率值通过式(3)计算得到

$$f_s = N \times f_r \pm f_{\text{CEO}} \quad (3)$$

式中：

N ——光频梳梳齿的模数；

f_r ——光频梳的重复频率，kHz；

f_{CEO} ——光频梳的载波包络频移，kHz；

$$f_{\text{CEO}} = (\Delta\varphi / 2\pi) f_r \quad (4)$$

式中：

$\Delta\varphi$ ——载波包络相移，rad

被校准稳频激光器的真空波长需要 n ($n \geq 2$) 次测量取平均值来确定，即

$$\bar{\lambda}_x = \frac{c}{n} \sum_{i=1}^n \frac{10^6}{f_{xi}} \quad (5)$$

式中：

$\bar{\lambda}_x$ ——被校准稳频激光器的平均真空波长值，nm；

f_{xi} ——第 i 次测量得到的被校准稳频激光器的光频率，kHz；

每次测量之间应将被校准稳频激光器关机，在校准环境中放置不少于 2 小时，再开机测量。

7.2 相对频率稳定度

不论参考光源为波长标准激光器还是光频梳，相对频率稳定度的测量方法均

一致。

被校准稳频激光器的相对频率稳定度的测量和真空波长值的测量同步完成。取样时间分别取 1 s、10 s、100 s 和 1000 s。不同取样时间内的相对频率稳定度用阿伦方差表示：

$$\sigma = \frac{1}{f_x} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{M-1} (\bar{\Delta f}_{i+1} - \bar{\Delta f}_i)^2}{2(M-1)}} \quad (6)$$

式中：

σ ——阿伦方差；

M ——测得的平均频差 Δf 的个数；

\bar{f}_x ——被校准稳频激光器在测量时间内的平均频率，kHz；

$\bar{\Delta f}_i$ ——一定取样时间内，被校准稳频激光器与参考光第 i 次测量的平均频差，kHz。

将采集到的激光频率值（取样时间为 0.1 s），依采集的先后顺序以每 10 个为一组，求出每组的算数平均值，作为取样时间为 1 s 的激光平均频率值。依此类推，如果将每组中的数据依次设定为 100 个、1000 个、10000 个，就可以分别得到取样时间为 10 s、100 s 和 1000 s 的平均频率值。根据(6)式可计算出不同取样时间的激光相对频率稳定度。

8 校准结果表达

校准结果在校准证书上反映。校准证书至少包含以下信息：

- a) 标题：“校准证书”；
- b) 实验室名称和地址；
- c) 进行校准的地点（如果与实验室的地址不同）；
- d) 证书的唯一性标识（如编号），每页及总页数的标识；
- e) 客户的名称和地址；
- f) 被校对象的描述和明确标识；
- g) 进行校准的日期，如果与校准结果的有效性和应用有关时，应说明被校对象的接收日期；

- h) 校准所依据的技术规范的标识，包括名称及代号；
- i) 本次校准所用测量标准的溯源性和有效性说明；
- j) 校准环境的描述；
- k) 校准结果及其测量不确定度的说明；
- l) 对校准规范的偏离的说明；
- m) 校准证书或校准报告签发人的签名或等效标识；
- n) 校准结果仅对被校对象有效的声明；
- o) 未经实验室书面批准，不得部分复制证书的声明；

9 复校时间间隔

由于复校时间间隔的长短是由仪器的使用情况、使用者、仪器本身质量等诸多因素所决定的，因此，送校单位可根据实际使用情况自主决定复校时间间隔。

建议复校时间间隔不超过一年。

附录A 校准记录内容

波长标准激光器校准稳频激光器原始记录

证书编号：_____

送校单位：_____ 送校时间：_____年____月____日

联系地址：_____

仪器/设备名称：_____

规格型号：_____ 出厂编号：_____

制造商：_____ 外观检查：_____

校准地点：_____

环境温度：_____℃ 环境湿度：_____ % RH

校准所依据的技术规范（名称、代号）

校准使用的计量基（标）准装置（含标准物质）/主要仪器

名 称	测量范围	不确定度/ 准确度等级	证书编号	证书有效期至 (YYYY-MM-DD)

波长标准激光的频率值： $f_s =$ _____MHz

1. 测量时间（_____小时）内被校准稳频激光器的平均真空波长和频率值：

平均真空波长值： $\bar{\lambda}_x =$ _____nm

平均频率值： $\bar{f}_x =$ _____MHz

2. 被校准稳频激光器的平均真空波长相对扩展不确定度：

$$U(\bar{\lambda})_x = \text{_____} \quad (k=2)$$

3. 测量时间（_____小时）内被校准稳频激光器的相对波长稳定度：

1 s

10 s

100 s

1000 s

4. 电脑输出结果：

- (1) 波长漂移曲线（1 s）
- (2) 频率稳定度曲线
- (3) 相对波长稳定度
- (4) 校准日期、环境条件、波长参考激光的频率
- (5) 数据文件名，等

校准时间：_____年____月____日

测试员：_____ 核验员：_____

光频梳校准稳频激光器原始记录

证书编号：_____

送校单位：_____ 送校时间：_____年____月____日

联系地址：_____

仪器/设备名称：_____

规格型号：_____ 出厂编号：_____

制造商：_____ 外观检查：_____

校准地点：_____

环境温度：_____°C 环境湿度：_____ % RH

校准所依据的技术规范（名称、代号）

校准使用的计量基（标）准装置（含标准物质）/主要仪器

名 称	测量范围	不确定度/ 准确度等级	证书编号	证书有效期至 (YYYY-MM-DD)

重复频率的模数 $N=$ _____, 重复频率 $f_r=$ _____ MHz

载波包络相移频率 $f_0=$ _____ MHz

光频梳梳齿的频率值: $f_s=$ _____ MHz

1. 测量时间 (_____ 小时) 内被校准稳频激光器的平均真空波长和频率值:

平均真空波长值: $\bar{\lambda}_x=$ _____ nm

平均频率值: $\bar{f}_x=$ _____ MHz

2. 被校准稳频激光器的平均真空波长相对扩展不确定度:

$U(\bar{\lambda})_x=$ _____ (k=2)

3. 测量时间 (_____ 小时) 内被校准稳频激光器的相对波长稳定度:

1 s

10 s

100 s

1000 s

4. 电脑输出结果:

- (1) 波长漂移曲线 (1 s)
- (2) 频率稳定度曲线
- (3) 相对波长稳定度
- (4) 校准日期、环境条件、波长参考激光的频率
- (5) 数据文件名, 等

校准时间: _____ 年 _____ 月 _____ 日

测试员: _____ 核验员: _____

附录B 校准证书内页内容

校 准 结 果

1、测量时间（ 小时）内的平均真空波长（频率）值：

$$\lambda = \underline{\hspace{2cm}} \text{ nm} \quad (f = \underline{\hspace{2cm}} \text{ MHz})$$

2、测量时间（ 小时）内的相对频率稳定度：

1 秒取样时间：

10 秒取样时间：

100 秒取样时间：

1000 秒取样时间：

3、平均真空波长相对扩展不确定度：

$$U(\lambda) = \underline{\hspace{2cm}} \quad (k=2)$$

说明：

根据客户要求和校准文件的规定，通常情况下_____个月校准一次。

由于复校时间间隔的长短是由仪器的使用情况、使用者、仪器本身质量等诸因素所决定的，因此，送校单位可根据实际使用情况自主决定复校时间间隔。

声明：

1. 本证书的校准结果仅对本次所校准的计量器具有效。

校 准 员：

核 验 员：

附录C 测量不确定度评定示例

附录 C 给出了稳频激光器真空波长的测量不确定度评定方法。

C.1 使用高稳定度激光或光频梳校准稳频激光器的不确定度评定

C.1.1 测量模型

$$\lambda_x = \frac{c}{f_s \pm \Delta\bar{f}} \times 10^6 \quad (\text{C.1})$$

式中：

c ——真空中的光速，299 792 458 nm；

f_s ——参考激光的频率，kHz；

$\Delta\bar{f}$ ——参考激光与被校准稳频激光的平均频差，kHz。

C.1.2 各输入量的灵敏系数

$$|c_1| = \frac{\partial \lambda_x}{\partial f_s} = \frac{c}{(f_s \pm \Delta\bar{f})^2} \times 10^6$$

$$|c_2| = \frac{\partial \lambda_x}{\partial (\Delta\bar{f})} = \frac{c}{(f_s \pm \Delta\bar{f})^2} \times 10^6$$

C.1.3 各输入量的标准测量不确定度

各输入量的标准测量不确定度分别为参考激光的频率标准不确定度 $u(f_s)$ 和平均频差的标准不确定度 $u(\Delta\bar{f})$ 。

C.1.4 各输入量引入的不确定度分量

$$u_i = |c_i| \cdot u(x_i)$$

C.1.5 单次测量的合成标准不确定度

各输入量互不相关，所以合成不确定度为：

$$u_{cs}(\lambda_x) = \sqrt{\sum u_i^2} = \frac{c}{(f_s \pm \Delta\bar{f})^2} \times 10^6 \sqrt{u(f_s)^2 + u(\Delta\bar{f})^2}$$

由于波长参考激光的频率不确定度 $u(f_s)$ 不大于被校准稳频激光器的频率不确定度 $u(\Delta\bar{f})$ 的 1/3，所以上式中的 $u(f_s)$ 可以被忽略。因此，被校准稳频激光器

的波长不确定度为

$$u_{\text{cs}}(\lambda_x) = \frac{c}{(f_s + \Delta\bar{f})^2} \times 10^6 \times u(\Delta\bar{f})$$

在频差测量中，频率计数器的最大误差值为 1 Hz，相对光频，其测量不确定度为 10^{-14} 量级，由其引入的误差可以忽略。波长参考激光的频率不确定度远小于被校准稳频激光器的频率不确定度，也可以被忽略。所以 $u(\Delta\bar{f}) \approx u(f_x)$ 。

C.1.6 复现性引入的不确定度

复现性引入的不确定度表示为 n ($n \geq 2$) 次测量中，各次测量获得的波长平均值之间的极差，即

$$u_{\text{re}}(\lambda_x) = \lambda_{x\text{max}} - \lambda_{x\text{min}}$$

C.1.7 合成不确定度

$$u_{\text{c}}(\lambda_x) = \sqrt{u_{\text{cs}}(\lambda_x)^2 + u_{\text{re}}(\lambda_x)^2}$$

C.1.8 扩展不确定度

$$U = k \cdot u_{\text{c}}(\lambda_x), \quad k = 2$$

C.1.9 相对扩展不确定度

$$U_{\text{rel}} = \frac{U}{\lambda_x}, \quad k = 2$$

参考文献

- [1] J. A. Barnes, et al., Characterization of Frequency Stability, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. IM-20, no. 2, pp. 105-120, May 1971.
- [2] M. T. Murphy, et al. High-precision wavelength calibration with laser frequency combs, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2007