



黑 龙 江 省 地 方 计 量 技 术 规 范

JJF（黑）07-2014

快速动态双频激光干涉仪校准规范

Calibration Specification for Fast Dynamic Heterodyne Interferometer

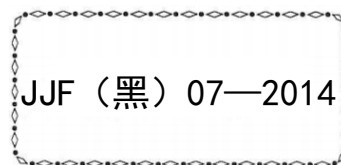
2014-08-12 发布

2014-09-01 实施

黑 龙 江 省 质 量 技 术 监 督 局 发 布

快速动态双频激光干涉仪 校准规范

Calibration Specification for
Fast Dynamic Heterodyne Interferometer



归口单位：黑龙江省质量技术监督局

起草单位：哈尔滨工业大学

黑龙江省计量检定测试院

本规范由黑龙江省质量技术监督局负责解释

本规范主要起草人：

谭久彬（哈尔滨工业大学）

胡鹏程（哈尔滨工业大学）

高树侠（黑龙江省计量检定测试院）

参加起草人：

杨宏兴（哈尔滨工业大学）

付海金（哈尔滨工业大学）

目 录

引 言.....	(II)
1 范围.....	(1)
2 引用文件.....	(1)
3 术语和定义.....	(1)
3.1 快速动态双频激光干涉仪.....	(1)
3.2 位移测量静态示值误差.....	(1)
3.3 测量数据更新率.....	(1)
3.4 最大测量速度.....	(1)
3.5 动态采样不准确引入的测量示值误差.....	(2)
4 概述.....	(2)
5 计量特性.....	(2)
5.1 激光频率稳定度.....	(2)
5.2 环境参数示值误差.....	(2)
5.3 非线性.....	(2)
5.4 位移测量静态示值误差.....	(2)
5.5 测量数据更新率.....	(2)
5.6 动态采样不准确引入的测量示值误差.....	(2)
6 校准条件.....	(3)
6.1 环境条件.....	(3)
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 校准项目.....	(3)
7.2 校准方法.....	(3)
8 校准结果的表达.....	(6)
9 复校时间间隔.....	(6)
附录 A 快速动态双频激光干涉仪位移测量静态示值误差测量结果不确定度评定..	(7)
附录 B 校准证书内容	(11)
附录 C 校准证书内页格式	(12)

引 言

JJF 1071—2010《国家计量校准规范编写规则》、JJF 1001—2011《通用计量术语及定义》和 JJF 1059.1—2012《测量不确定度评定与表示》共同构成制定本校准规范的基础性系列规范。本规范经查询未见“快速动态双频激光干涉仪”的国际建议、国际标准或国家标准，本规范的主要性能指标参考黑龙江省地方标准“DB23/T 1528—2014 快速动态双频激光干涉仪技术规程”。

本规范为首次制定文件。

快速动态双频激光干涉仪校准规范

1 范围

本规范适用于快速动态双频激光干涉仪的校准。

2 引用文件

本规范引用了下列文件：

JJG 739-2005 激光干涉仪

JJF 1001-2011 通用计量术语及定义

JJF 1059.1-2012 测量不确定度评定与表示

JJF 1071-2010 国家计量校准规范编写规则

JJF 1094-2002 测量仪器特性评定

JJF 1130-2005 几何量测量设备校准中的不确定度评定指南

GB/T 17163-2008 几何量测量器具术语 基本术语

JB/T 5610-2006 激光干涉仪

凡是注明日期的引用文件，仅注日期的版本适用于本规范；凡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 术语和定义

本规范采用下列术语和定义以及所有 JJF1001、GB/T 17163 中的术语和定义，其中部分术语和定义如下：

3.1 快速动态双频激光干涉仪 high speed dynamic heterodyne interferometer

以激光波长为测量标准，按多普勒效应产生的多普勒频移进行几何量测量的快速、动态测量仪器，其最大测量速度范围为500 mm/s -5000 mm/s，测量数据更新率为2 kHz-10 MHz。

3.2 位移测量静态示值误差 indication error of static displacement

利用快速动态双频激光干涉仪测量被测目标的位移，被测目标产生位移后保持静止，此时快速动态双频激光干涉仪的示值误差。

3.3 测量数据更新率 measurement data update rate

激光干涉仪测量结果更新和输出的速度。

3.4 最大测量速度 maximum speed

保证激光干涉仪正常工作时测量反射镜的最大移动速度。

3.5 动态采样不准确引入的测量示值误差 indication error induced by dynamic sampling

当测量目标连续运动时,快速动态双频激光干涉仪输出的测量结果中,由于采样延迟不准确引入的位移测量示值误差分量。

4 概述

快速动态双频激光干涉仪是以激光波长为基准、按多普勒效应产生的多普勒频移进行几何量测量的测量仪器,主要用于位移的测量与标定,也可用于多个位移量的同步测量。快速动态双频激光干涉仪由双频激光器、干涉镜、反射镜、环境参数传感器、相位测量板卡与软件等组成。快速动态双频激光干涉仪可实现从静态位移量到动态位移量的实时测量与标定,可用作运动目标的实时位置监测与超精密动态定位。

5 计量特性

5.1 激光频率稳定度

快速动态双频激光干涉仪的激光频率稳定度不超过 $4 \times 10^{-9} / 3h$,也不超过 $10 \times 10^{-9} / 2h$ 。

5.2 环境参数示值误差

5.2.1 空气温度传感器的最大允许示值误差不超过 $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$;

5.2.2 空气压力传感器的最大允许示值误差不超过 50 Pa ;

5.2.3 空气湿度传感器的最大允许示值误差不超过 8 \% RH 。

5.2.4 材料温度传感器的最大允许示值误差不超过 $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

5.3 非线性

快速动态双频激光干涉仪的非线性应不超过 5 nm 。

5.4 位移测量静态示值误差

快速动态双频激光干涉仪的位移测量静态最大允许示值误差不超过 $0.03\text{ }\mu\text{m} + 6 \times 10^{-7} D$ 。

D ——被测长度。

5.5 测量数据更新率值

快速动态双频激光干涉仪的测量数据更新率应不小于 2 kHz 。

5.6 动态采样不准确引入的测量示值误差

快速动态双频激光干涉仪中动态采样不准确引入的测量最大允许示值误差不超过 5 nm。

6 校准条件

6.1 环境条件

快速动态双频激光干涉仪校准的室内温度应在 $22^{\circ}\text{C}\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 范围内，一次测量中空气温度变化不超过 0.1°C ；室内相对湿度范围应在40%RH-60%RH之间；测量过程中气压变化不超过0.05个标准大气压/h；测量环境洁净度达到1000级；地基在水平和垂直方向振动速度的1/3倍频程谱在1 Hz~100 Hz内均小于 $2\text{ }\mu\text{m/s}$ 。

6.2 测量标准及其他设备

测量标准及其他设备见表 1。

表 1 校准项目、测量标准和其他设备

序号	校准项目	测量标准和其他设备
1	激光频率稳定度	633nm碘稳频激光器（激光波长不确定度不超过 5×10^{-10} ， $k=2$ ）、频率计（频率测量不确定度不超过1 kHz， $k=2$ ）、高速光电探测器（带宽应包括0-1GHz）
2	环境参数示值误差	
	2.1空气温度传感器	二等铂电阻温度计，恒温槽（温度均匀性 0.01°C ），数字万用表（电阻测量最大示值误差不超过 $0.001\text{ }\Omega$ ）
	2.2空气压力传感器	气压密封罐（气压稳定性不超过 $10\text{ Pa}/5\text{ min}$ ），气压调节器，数字气压计（示值误差不超过 0.01 %）
	2.3空气湿度传感器	湿度计（示值误差不超过2% RH）
	2.4材料温度传感器	同2.1
3	非线性	微位移运动台（压电陶瓷开环行程大于 $2\text{ }\mu\text{m}$ ，开环分辨力小于 0.3 nm ）
4	测量数据更新率	计时器（测量不确定度不超过1 ms， $k=2$ ），位移测量数据采集系统
5	位移测量静态示值误差	激光干涉比长仪或其他激光测长装置（测长不确定度不超过 $0.1\text{ }\mu\text{m/m}$ ， $k=2$ ）
6	动态采样不准确引入的测量示值误差	信号发生器（带宽应包括0-20 MHz，频率分辨力小于10kHz，频率稳定度应不超过 10^{-6} ），电光调制器（带宽应包括0-20 MHz），位移测量数据采集系统

注：可采用满足测量不确定度要求的其他测量标准及其他设备进行校准。

7 校准项目和校准方法

7.1 校准项目

需校准项目见表 1。

7.2 校准方法

首先检查快速动态双频激光干涉仪的外观和各部分相互作用，确定没有影响计量

特性因素后再进行校准。

校准前快速动态双频激光干涉仪在室内平衡温度的时间不小于 3 h；对激光频率稳定度和位移测量性能校准前，双频激光器需开机预热 20 min 以上；位移测量性能校准前，双频激光器和数据处理卡需开机预热 20 min 以上，并在运行平稳后将仪器的数据处理卡输出置零。

7.2.1 激光频率稳定度

激光频率稳定度校准如图1所示，以633nm碘稳频激光器输出的激光波长为标准，利用分光棱镜将633nm碘稳频激光器输出的激光与快速动态双频激光干涉仪中双频激光器输出的激光进行光束合成，利用高频光电探测器将合成光束转换为电信号，再利用频率计来测量电信号的频率 f ，该频率为两激光器发出激光的频率之差。

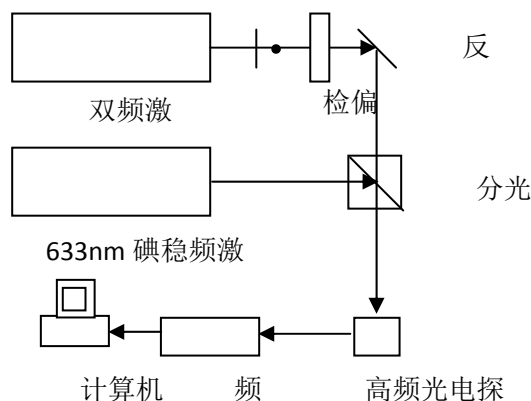


图1 激光频率稳定度校准示意图

在连续72h内对频率 f 进行连续测量。设任意的连续3h测量中，测得频率 f 的最大值为 $f_{A\max}$ ，最小值为 $f_{A\min}$ 。则快速动态双频激光干涉仪的3h激光频率稳定度的测量值为：

$$\left| \frac{\Delta \nu}{\nu} \right|_{3h} = \frac{f_{A\max} - f_{A\min}}{\nu} \quad (1)$$

式中，激光频率 $\nu = 4.74 \times 10^{14} \text{ Hz}$ 。

设连续72h测量中，测得频率 f 的最大值为 $f_{B\max}$ ，最小值为 $f_{B\min}$ 。则快速动态双频激光干涉仪72h激光频率稳定度的测量值为：

$$\left| \frac{\Delta \nu}{\nu} \right|_{3\text{days}} = \frac{f_{B\max} - f_{B\min}}{\nu} \quad (2)$$

7.2.2 环境参数示值误差

7.2.2.1 空气、材料温度传感器示值误差

空气、材料温度传感器示值误差测量根据 JJG 739-2005 激光干涉仪检定规程中 7.3.5.1 检定方法来进行。

7.2.2.2 空气压力传感器示值误差

空气压力传感器示值误差测量根据 JJG 739-2005 激光干涉仪检定规程中 7.3.5.2 检定方法来进行。

7.2.2.3 空气湿度传感器示值误差

空气湿度传感器示值误差测量根据 JJG 739-2005 激光干涉仪检定规程中 7.3.5.3 检定方法来进行。

7.2.3 非线性

非线性校准如图 2 所示,用微位移运动台来测试快速动态双频激光干涉仪的非线性。

a) 将微位移运动台放在被测快速动态双频激光干涉仪测量光束的延长线上,且微位移运动台的运动方向与测量光束平行。

b) 将被测快速动态双频激光干涉仪的线性位移测量反射镜放置在微位移运动台上。

c) 利用周期三角波电压驱动微动工作台的压电陶瓷使反射镜作匀速、往返扫描运动,且运动范围 $2\ \mu\text{m}$ ~ $50\ \mu\text{m}$,运动速度范围 $0.1\ \mu\text{m/s}$ ~ $30\ \mu\text{m/s}$ 。

d) 在反射镜匀速、往返扫描运动过程中等周期采集被测快速动态双频激光干涉仪的测量值,采样周期不超过 $1\ \text{ms}$,采样周期不确定度不超过 $0.01\ \text{ms}$ ($k=3$)。

e) 非线性的计算

取反射镜在匀速、往返扫描运动中的任意一次单向运动过程的连续测量数据 $L_0\sim L_i$,利用最小二乘法将 $L_0\sim L_i$ 拟合成以 i 为横坐标,以 i 为纵坐标的一个三次多项式曲线和一条直线,将原数据曲线、三次多项式曲线和直线旋转相同的角度,使直线与 x 轴平行。此时,三次多项式曲线与原数据曲线之间垂直距离的极大值,即为被测快速动态双频激光干涉仪的非线性。

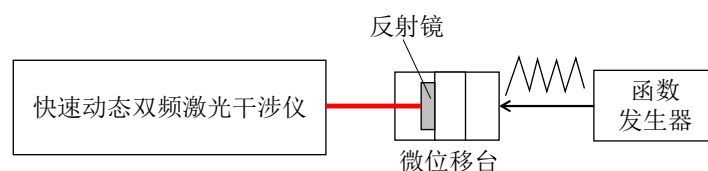


图 2 非线性校准示意图

7.2.4 位移测量静态示值误差

位移测量静态示值误差的测量根据 JJG 739-2005 激光干涉仪检定规程中 7.3.4 检定方法来进行。

7.2.5 测量数据更新率

将快速动态双频激光干涉仪测量数据输出速度设定为最大值时,利用位移测量数据采集系统来采集快速动态双频激光干涉仪输出的测量数据并采用计时器计时,在10s内采集到的测量结果个数为 N ,取其平均值 $N/10$ 作为测量数据更新率的测量结果。

7.2.6 动态采样不准确引入的测量示值误差

a) 快速动态双频激光干涉仪输出的双频激光的频差为 f_b ,用偏振分光棱镜分离出双频光束中的一种频率成分激光,并用电光调制器来将其变成光强调制光,光强调制频率 f_m 为:

$$f_m = f_b + 2V / \lambda \quad (3)$$

式中, V 是通过光强调制等效获得的目标反射镜运动速度,激光波长 $\lambda=633\text{ nm}$ 。

调制后的激光束正常返回快速动态双频激光干涉仪的探测器。此时快速动态双频激光干涉仪可等效为目标反射镜以速度 V 运动的测量情况。

b) 等间隔、连续采集快速动态双频激光干涉仪输出的5000个位移测量值,位移输出值与采样点次序有一一对应关系,利用最小二乘法拟合两者的线性关系直线,则根据线性关系直线与5000点位移数据的差值,可以获得被测物体运动速度为 V 时,动态采样延迟不确定引入的位移测量不确定度。

c) 根据快速动态双频激光干涉仪给出的最大测量速度标称值 V_{\max} ,逐步改变 f_m 的值,使其依次等于 $f_b - 2V_{\max} / \lambda$ 、 $f_b - V_{\max} / \lambda$ 、 f_b 、 $f_b + V_{\max} / \lambda$ 、 $f_b + 2V_{\max} / \lambda$,则获得速度 $-V_{\max}$ 、 $-V_{\max}/2$ 、 0 、 $V_{\max}/2$ 和 V_{\max} 时动态采样不准确引入的测量示值误差。取其最大值作为快速动态双频激光干涉仪由于动态采样不准确引入的测量示值误差。

8 校准结果的表达

经过校准的快速动态双频激光干涉仪出具校准证书,校准证书格式及内容参见附录C。

9 复校时间间隔

建议一般不超过1年。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。

附录 A

快速动态双频激光干涉仪位移测量静态示值误差测量结果不确定度评定

A.1 概述

对快速动态双频激光干涉仪位移测量静态示值误差测量结果不确定度，依据JJF 1130-2005《几何量测量设备校准中的不确定度评定指南》中 $U < U_T$ 的合格判据，对给定的测量任务判断其测量程序和测量条件的可行性和合格性。

A.2 测量任务和目标不确定度

A.2.1 测量任务

用规范规定的技术要求、测量原理、测量条件、测量方法和测量程序，测量快速动态双频激光干涉仪的位移测量静态示值误差。

A.2.2 目标不确定度

根据JJF 1094-2002《测量仪器特性评定技术规范》的规定，快速动态双频激光干涉仪位移测量静态示值误差的扩展不确定度与其最大允许误差的绝对值之比，应小于或等于1:3。

由此可以得到与规范技术要求相对应的目标不确定度 $U_T = 0.01 \mu\text{m} + 2 \times 10^{-7} D$ 。

A.3 测量原理、方法和条件

A.3.1 测量原理和方法

利用激光比长仪和快速动态双频激光干涉仪进行比对测量，二者对同一运动目标进行共光路测量，两者测量光束方向的夹角不超过0.2 mrad。在运动目标静止时两者的读数之差即为示值误差。即

$$\begin{aligned} e &= D_i - D_s \\ D_i &= f(\delta_{fr}, \delta_{nl}, \delta_{air}) \end{aligned} \quad (\text{A.1})$$

其中： e ——为位移测量静态示值误差；

D_i ——为快速动态双频激光干涉仪的示值；

D_s ——为激光比长仪的示值；

δ_{θ} ——为余弦误差引入的误差分量；

δ_{nl} ——为非线性引入的误差分量；

δ_{air} ——为空气折射率不均等引入的误差分量；

δ_d ——为目标反射镜漂移引入的误差分量。

δ_θ 、 δ_{nl} 、 δ_{air} 、 δ_d 分别用 u_θ 、 u_{nl} 、 u_{air} 、 u_d 表示，激光比长仪测长不确定度用 u_s 表示。

A.3.2 方差和灵敏系数

$$\text{方差: } u^2 = c_1^2 u_s^2 + c_2^2 u_\theta^2 + c_3^2 u_{nl}^2 + c_4^2 u_{air}^2 + c_5^2 u_d^2 \quad (\text{A.2})$$

灵敏系数: $c_1=1$; $c_2=1$; $c_3=1$; $c_4=1$; $c_5=1$ 。

A.3.3 测量条件

校准的室内温度应在 $20^\circ\text{C}\pm 0.5^\circ\text{C}$ 范围内，一次测量中空气温度变化不超过 0.1°C ；室内相对湿度范围应在40% RH-60% RH之间；测量过程中气压变化不超过0.05个标准大气压/h；测量环境洁净度达到1000级；校准前快速动态双频激光干涉仪在室内平衡温度的时间不少于3 h；地基在水平和垂直方向振动速度的1/3倍频程谱在1 Hz~100 Hz内均小于3 $\mu\text{m/s}$ 。

A.4 标准不确定度分量的来源和说明

见表 A.1。

表 A.1 快速动态双频激光干涉仪位移测量静态示值测量不确定度分量来源和说明

序号	符号	不确定度分量名称	说明
1	u_s	激光比长仪测量不确定度引入的标准不确定度分量	由激光比长仪校准证书给出
2	u_θ	余弦误差引入的标准不确定度分量	快速动态双频激光干涉仪与激光比长仪之间光轴夹角 θ 引入的误差分量
3	u_{nl}	非线性引入的标准不确定度分量	共光路测量时非线性引入的测量误差
4	u_{air}	空气折射率不均等引入的标准不确定度分量	快速动态双频激光干涉仪与激光比长仪两者光轴的空气折射率不均等引入的误差分量
5	u_d	目标反射镜漂移引入的标准不确定度分量	目标反射镜漂移时，快速动态双频激光干涉仪与激光比长仪读数不同步引入的误差分量

A.5 标准不确定度分量的说明和计算

A.5.1 激光比长仪测量不确定度引入的标准不确定度分量

激光比长仪测量相对不确定度 1×10^{-7} , $k=2$, 则:

$$u_s = \frac{1 \times 10^{-7} D}{2}$$

A. 5. 2 余弦误差引入的标准不确定度分量

快速动态双频激光干涉仪与激光比长仪之间光轴夹角为 θ , 此时引入的余弦误差 $\delta\theta$ 可表示为:

$$\delta\theta \approx \frac{\theta^2 D}{2}$$

光轴夹角 θ 不超过 ± 0.2 mrad, 其符合矩形(均匀)分布, 因此光轴夹角 θ 的标准不确定度可以表示为:

$$u_\theta = \theta D u_{\delta\theta} = \frac{(2 \times 10^{-4})^2 D}{\sqrt{3}}$$

A. 5. 3 非线性引入的标准不确定度分量

非线性不超过 ± 5 nm, 其符合矩形(均匀)分布, 则:

$$u_{nl} = \frac{5 \text{ nm}}{\sqrt{3}}$$

A. 5. 4 空气折射率不均等引入的标准不确定度分量

快速动态双频激光干涉仪与激光比长仪两者光轴的空气折射率不均等, 空气折射率之差为 5×10^{-8} , 取 $k=3$, 则:

$$u_{air} = \frac{5 \times 10^{-8} D}{3}$$

A. 5. 5 目标反射镜漂移引入的标准不确定度分量

目标反射镜漂移时, 快速动态双频激光干涉仪与激光比长仪读数不同步引入的误差分量, 考虑到漂移速度小于 $\pm 2 \mu\text{m/s}$, 采样率大于2 kHz, 则漂移量不超过 ± 1 nm, 其符合矩形(均匀)分布, 则:

$$u_d = \frac{1 \text{ nm}}{\sqrt{3}}$$

A. 6 合成标准不确定度

以上分量彼此独立互不相关, 根据公式(A.2), 可得位移静态测量示值的标准不确定度 u 为:

$$u = \sqrt{\left(\frac{1 \times 10^{-7} D}{2}\right)^2 + \left(\frac{(2 \times 10^{-4})^2 D}{\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{5 \text{ nm}}{\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{5 \times 10^{-8} D}{3}\right)^2 + \left(\frac{1 \text{ nm}}{\sqrt{3}}\right)^2}$$

$$\approx 0.003 \mu\text{m} + 0.57 \times 10^{-7} D$$

A.7 扩展不确定度

按正态分布计算，取 $k=2$ ，则位移静态示值的测量不确定度为：

$$U = 0.006 \mu\text{m} + 1.2 \times 10^{-7} D$$

附录 B

校准证书内容

1. 标题：校准证书；
2. 实验室名称和地址；
3. 证书或报告的唯一标识（如编号）、每页及总页数的标识；
4. 送校单位的名称和地址；
5. 被校对象的描述和明确标识；
6. 进行校准的日期；
7. 对校准所依据的技术规范的标识，包括名称及代码；
8. 本次校准所用测量标准的溯源性及有效性说明；
9. 校准环境的描述；
10. 激光频率稳定度、非线性、测量数据更新率、位移测量静态示值误差、最大测量速度和动态采样不准确引入的测量示值误差的说明；
11. 校准证书或校准报告签发人的签名或等效标识，以及签发日期；
12. 校准结果仅对被校对象有效的声明；
13. 未经校准实验室书面批准，不得部分复制证书的声明。

附录 C

校准证书内页格式

证书编号：

校准所依据的技术文件（代号、名称）： JJF (黑)XXXX-XXXX 快速动态双频激光干涉仪校准规范				
校准环境：温度 °C；相对湿度： %；大气压： hPa				
校准地点：				
本次校准所用测量标准				
名称	测量范围	准确度/等级	证书编号	有效日期
校准项目与校准结果				
序号	校准项目		校准结果	
1	激光频率稳定度			
2	非线性			
3	位移测量静态示值误差			
4	测量数据更新率			
5	动态采样不准确引入的测量示值误差			
位移测量静态示值误差测量不确定度：				

校准员：

核验员：

