

中华人民共和国国家计量技术规范

JJF ××××—202X

激光干涉仪校准规范

Calibration Specification for Laser Interferometer

(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

激光干涉仪校准规范

Calibration Specification for Laser Interferometer

JJF ××××—202X

代替 JJG 331—1994

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

XXX

参加起草单位：XXX

本规范委托全国几何量长度计量技术委员会负责解释

本规范主要起草人：

参加起草人：

目 录

引 言.....	II
1 范围.....	1
2 引用文件.....	1
3 术语.....	1
4 概述.....	1
5 计量特性.....	1
6 校准条件.....	2
6.1 环境条件.....	2
6.2 测量标准及其他设备.....	2
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 校准结果表达.....	6
9 复校时间间隔.....	6
附 录 A 激光干涉仪的位移测量示值误差的测量不确定度评定示例.....	7
附 录 B 校准证书内容及内页格式.....	11

引 言

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》共同构成支撑本规范制定的基础性系列规范。

本规范代替 JJG739—2005《激光干涉仪检定规程》。与 JJG739—2005 相比，除编辑性修改外，主要技术变化如下：

——第 2 部分增加了部分引用文件；

——更新了激光干涉仪术语表达与激光干涉仪的概述；

——第 5 部分将“角分度误差”更改为“角度测量示值误差”；

——第 6.2 部分修改了部分校准项目、测量标准及设备；

——第 7 部分增加了不同配置下的激光干涉仪校准项目列表；

——更新了“位移测量示值误差”、“环境参数传感器误差”、“角度测量示值误差”的校准方法；

——增加了附录 A 激光干涉仪的位移测量示值误差的测量不确定度评定示例。

本规范历次版本发布情况为：

——JJG739-2005。

——JJG739-1991。

激光干涉仪校准规范

1 范围

本规范适用于激光干涉仪的校准。

2 引用文件

本规范引用下列文件：

JJF XXX	稳频激光器校准规范（待发布）
JJG 998	激光小角度测量仪检定规程
JJG 160	标准铂电阻温度计
JJF 1171	温度巡回检测仪校准规范
JJG 860	压力传感器(静态)检定规程
JJF 1076	数字式温湿度计校准规范
JJG 205	机械式温湿度计
JB/T 5610	激光干涉仪

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

激光干涉仪非线性：激光干涉仪为了获得高分辨力，在一个干涉周期内对干涉条纹进行细分时引起的测长误差。

4 概述

激光干涉仪是以激光波长为测量标准，利用干涉原理进行位移、直线度、角度等几何量测量的高精度、多功能计量仪器。

激光干涉仪包括激光光源，信号处理单元，光学组件，环境参数补偿单元，测量软件等，广泛应用于高端制造、精密测量、计量等领域的几何量测量。

5 计量特性

5.1 激光真空波长

5.2 位移测量示值误差

5.3 环境参数示值误差

5.3.1 空气、材料温度传感器示值误差

5.3.2 空气压力传感器示值误差

5.3.3 空气湿度传感器示值误差

5.4 角度测量示值误差

5.5 直线度示值误差

5.6 非线性

6 校准条件

6.1 环境条件

6.1.1 校准环境要求

线性位移测量：温度 $(20 \pm 1)^\circ\text{C}$ ，测量时温度波动 $< 0.2^\circ\text{C/h}$ ；

直线度测量：温度 $(20 \pm 0.5)^\circ\text{C}$ ；

非线性测量：温度 $(20 \pm 0.5)^\circ\text{C}$ ；

气压传感器测量：温度 $(20 \pm 3)^\circ\text{C}$ ；

湿度传感器测量：温度 $(20 \pm 5)^\circ\text{C}$ ；

6.1.2 校准前仪器应放置在规定的条件下，温度平衡时间不得少于 4 小时。

6.2 测量标准及其他设备

推荐使用表1所列仪器，允许使用其他满足不确定度要求的标准器进行校准。

表1 校准项目及校准用标准器计量特性要求

序号	校准项目	标准器及其他设备	技术指标
1	激光真空波长	波长基准或波长标准	相对标准不确定度优于 1×10^{-9}
2	位移测量示值误差	激光干涉比长仪或大长度比长装置	不确定度优于 $Q[50\text{nm}, 1 \times 10^{-7}L] (k=2)$
3	环境参数传感器示值误差	6.1 空气、材料温度传感器	参照相关技术规范进行校准
		6.2 空气压力传感器	参照相关技术规范进行校准
		6.3 空气湿度传感器	参照相关技术规范进行校准
4	角度测量示值误差	多齿分度台或转台	0 级多齿分度台，转台定位精度优于被测仪器最大允许误差绝对值的 1/3
5	直线度示值误差	微位移工作台，激光干涉仪	测长不确定度优于 $1.0 \mu\text{m/m} (k=2)$

6	非线性	F-P 激光干涉系统	不确定度优于 1nm ($k=2$)
---	-----	------------	----------------------

注：允许使用满足不确定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

不同配置下的激光干涉仪校准项目见表2。

表2 不同配置激光干涉仪的校准项目

配置	校准项目
基本配置	激光真空波长
	位移测量示值误差
配备环境参数模块	环境参数示值误差
配备角度模块	角度测量示值误差
配备直线度模块	直线度示值误差
不确定度优于 2nm	非线性

7.2 校准方法

7.2.1 激光真空波长

激光真空波长校准依据 **JJG XXX-XXX** 稳频激光器校准规范（待发布）进行。

7.2.2 位移测量示值误差

使用满足测量不确定度要求的激光干涉比长仪或大长度比长装置（以下简称标准激光干涉仪）作为标准器对被测激光干涉仪进行校准。

a) 调整测量光路，使被测激光干涉仪与标准激光干涉仪的光轴重合。

b) 使用气压 $p=101.324$ kPa，温度 $t=20^{\circ}\text{C}$ ，湿度 $f=50\%$ 的标准空气参数，分别置入标准激光干涉仪和被测激光干涉仪中进行位移测量，在测量范围内的每个校准位置处同步读取标准激光干涉仪与被测激光干涉仪的测量值。测量至少进行二次，取绝对值最大的示值误差作为每个校准位置的校准结果。

c) 使用两至三组非标准空气参数，分别置入标准激光干涉仪和被测激光干涉仪中进行

位移测量。取绝对值最大的示值误差作为每个校准位置的校准结果。

d) 标准激光干涉仪和被测激光干涉仪在使用各自配套的空气参数传感器进行激光空气波长修正的条件下进行位移测量。在测量范围内的每个校准位置处同步读取标准激光干涉仪与被测激光干涉仪的测量值。测量至少进行二次，取绝对值最大的示值误差作为每个校准位置的校准结果。

e) 测量范围应大于等于 1m。

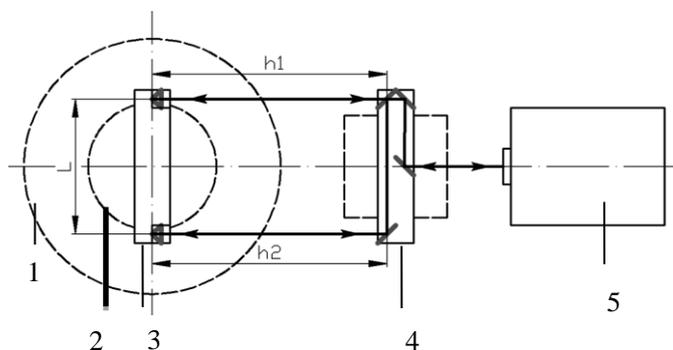
7.2.3 环境参数传感器示值误差

空气、材料温度传感器、空气压力传感器、空气湿度传感器依据相关技术规范进行校准，校准周期根据用户使用要求确定。

7.2.4 角度测量示值误差

将 360 齿多齿分度台安置并固定在回转台中心，调整同轴度小于 $2\mu\text{m}$ ，将激光小角度反射棱镜组安置并固定在多齿分度台中心，调整同轴度小于 0.3mm ，将分光镜组安置并固定在反射镜组前方，激光头安置在分光镜组前方。

校准系统组成如图 1 所示。



1——转台；2——多齿分度台 3——反射静组；4——分光静组；5——激光头

图 1 激光小角度校准系统

开始调整前，调整激光小角度光路，将光强调整到工作状态。

(1) 将多齿分度台至于零位，激光小角度基准示值清零

(2) 顺刻度转动多齿分度台 5° ，读取激光小角度测量结果为 c_1 ，然后用回转台反转至激光小角度测量结果为零，再将多齿分度台逆刻度转角 5° ，读取激光小角度测量结果为 c_2 ， c_1 与 c_2 的绝对值之差应不大于 0.00001° ，否则应重新调整初始零位角。重新调整时比较 c_1 与 c_2 的绝对值，角度值小的方向为初始零位角方向。按所判定的调整方向转动回转台，

调整激光小角度测量系统的初始零位，重新清零后重复上述测量，直至 c_1 与 c_2 的绝对值之差并不大于 0.00001° ，此时的零位作为测量分度误差时的最佳初始零位。

(3) 选取 $\pm 5^\circ$ 和 $\pm 1^\circ$ 两对校准点。采用多齿分度台排列互比法，或相同准确度的标准转台，发生 $\pm 5^\circ$ 和 $\pm 1^\circ$ 两对校准点的参考角位置，读取激光小角度测量结果与参考角位置值，比较计算 $\pm 5^\circ$ 和 $\pm 1^\circ$ 两对校准点上激光小角度测量误差。选取各校准点上测量误差极限值作为校准结果。

7.2.5 直线度示值误差

使用测量不确定度不大于 $1.0\mu\text{m}/\text{m}(k=2)$ 的激光干涉仪作为标准，检测被测激光干涉仪的直线度示值误差。

- a) 将被测激光干涉仪的直线度干涉镜固定在被测激光干涉仪测量光路上的一个微动工作台上，工作台的微动方向垂直于被测激光干涉仪光轴，如图2所示。

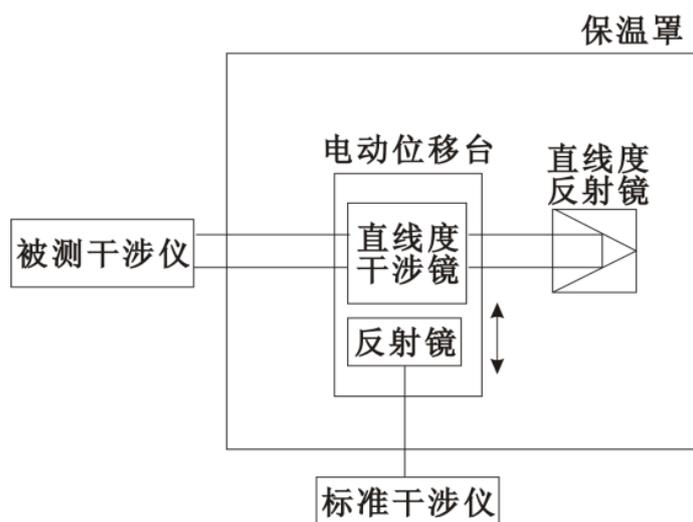


图2 直线度示值误差测量装置示意图

- b) 标准激光干涉仪的光路位于被测激光干涉仪光路的平面内并垂直于被测激光干涉仪光轴。
- c) 标准激光干涉仪的线性位移测量镜固定在被测激光干涉仪直线度干涉镜所固定的同一微动工作台上。
- d) 微调微动工作台的位置，记录标准激光干涉仪测量的位移值和被测激光干涉仪的直线度测量值。
- e) 计算各位置处两者之差，测量的最大示值误差作为直线度示值误差。

7.2.6 非线性误差

用测量不确定度不大于 $2\text{nm}(k=2)$ 的标准激光干涉系统测量被测激光干涉仪的非线性。

- a) 调整测量光路，使被测激光干涉仪与标准激光干涉系统的测量位移方向一致且重合。
- b) 将被测激光干涉仪的线性位移测量反射镜放置在驱动标准激光干涉系统反射镜移动的同时微动工作台上。
- c) 驱动微动工作台移动，同时记录标准激光干涉系统和被测激光干涉仪所测量的位移值 d_{fi} 和 d_i 。
- d) 测量范围应大于被测激光干涉仪波长值的两倍。
- e) 非线性的计算

根据测量数据，利用最小二乘法将数组 d_{fi} 和 d_i 分别拟合以 d_{fi} 为横坐标、以 d_i 为纵坐标的一个多项式曲线和一条直线，将该曲线和直线旋转相同的角度，使直线与 x 轴平行。将曲线极大点和极小点与直线的距离相加，得到被测激光干涉仪的非线性。

8 校准结果表达

经校准的激光干涉仪出具校准证书，给出校准结果以及校准不确定度。

9 复校时间间隔

在进行期间核查的情况下，建议复校时间间隔一般为 1 年。送校单位可以根据实际使用情况自行确定。

附录 A

激光干涉仪的位移测量示值误差的测量不确定度评定示例

A.1 测量方法

本规范按 7.2.2 方法，在工作状态下测量激光干涉仪在 1m 线性位移处的示值误差。

A.2 测量模型

$$\Delta L = L_i - L_r$$

式中：

ΔL —— 线性位移示值误差；

L_i —— 被测激光干涉仪的测量值；

L_r —— 标准激光干涉仪的参考值；

A.3 灵敏系数

根据测量模型，输入量 L_i 和 L_r 之间互相独立不相关，由不确定度传播规律得到：

$$u_c^2(\Delta L) = c_1^2 u^2(L_r) + c_2^2 u^2(\lambda) + c_3^2 u^2(n) + c_4^2 u^2(\theta) + c_5^2 u^2(nl)$$

式中：

L_r —— 标准激光干涉仪的参考值；

λ —— 被测干涉仪的激光波长值；

n —— 空气折射率；

θ —— 标准激光干涉仪与被测干涉仪光路的夹角；

nl —— 被测干涉仪的非线性误差；

灵敏系数：

$$c_1 = c_2 = c_3 = c_4 = c_5 = 1$$

A.4 不确定度分量的分析

A.4.1 标准激光干涉仪参考值引入的标准不确定度分量 $u(L_r)$

由标准激光干涉仪校准证书得到： $U=(0.02+0.04L) \mu\text{m}$ ， $k=2$ ， L 单位：米

当测量位移为1m时， $U=0.06 \mu\text{m}$ ，则：

$$u(L_r) = \frac{U}{k} = \frac{0.06 \mu\text{m}}{2} = 0.03 \mu\text{m}$$

A.4.2 激光波长误差引入的标准不确定度分量 $u(\lambda)$

由稳频激光器校准证书可以得到激光波长的不确定度为： $U=2.0E-08$ ， $k=2$ 。

当测量位移为1m时， $U=0.02\mu\text{m}$ ，则：

$$u(\lambda) = \frac{U}{k} = \frac{0.02\mu\text{m}}{2} = 0.01\mu\text{m}$$

A.4.3 空气折射率修正引入的标准不确定度分量 $u(n)$

激光干涉仪的工作波长值受空气折射率影响，一般采用Edlén公式对激光干涉仪测量结果进行空气折射率修正。在示值误差测量过程中，标准激光干涉仪与被测激光干涉仪使用各自配套的空气参数传感器对空气环境参数进行测量。环境参数的测量误差引入空气折射率误差，空气折射率修正引入的不确定度分量如下：

A.4.3.1 温度测量误差引入的标准不确定度分量 $u(t)$

设空气温度传感器的最大示值误差为 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ ，服从正态分布，温度对空气折射率的灵敏系数为 $9.298E-07\text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ 。当测量位移为1m时，则：

$$u(t) = \frac{0.1^\circ\text{C}}{3} \times 9.298 \times 10^{-7}\text{ }^\circ\text{C}^{-1} \times 1\text{m} = 0.031\mu\text{m}$$

A.4.3.2 气压测量误差引入的标准不确定度分量 $u(p)$

设气压传感器的最大示值误差为 $\pm 10\text{Pa}$ ，服从正态分布，气压对空气折射率的灵敏系数为 $2.682E-9\text{ Pa}^{-1}$ 。当测量位移为1m时，则：

$$u(p) = \frac{10\text{ Pa}}{3} \times 2.682 \times 10^{-9}\text{ Pa}^{-1} \times 1\text{m} = 0.009\mu\text{m}$$

A.4.3.3 湿度测量误差引入的标准不确定度分量 $u(f)$

设湿度传感器的最大示值误差为 $\pm 3\%$ ，服从正态分布，湿度对空气折射率的灵敏系数为 $0.371E-09\text{ Pa}^{-1}$ 。在标准大气压下， 20°C 时饱和水蒸气分压力为 2.34kPa 。当测量位移为1m时，则：

$$u(f) = \frac{3\% \times 2.34\text{ kPa}}{3} \times 0.371 \times 10^{-9}\text{ Pa}^{-1} \times 1\text{m} = 0.009\mu\text{m}$$

A.4.3.4 空气分布不均匀引入的标准不确定度分量 $u(\text{inhom})$

由于空气分布不均匀，标准激光干涉仪与被测激光干涉仪两者光轴之间的空气折射率存在差异，设空气折射率之差为 $5E-08$ ，服从正态分布，当测量位移为1m时，则：

$$u(\text{inhom}) = 5 \times 10^{-8} \times 1\text{m} = 0.05\mu\text{m}$$

A.4.3.5 Edlén公式引入的标准不确定度分量 $u(\text{Edlen})$

由于Edlén公式为经验公式，即使空气参数传感器测量结果不存在误差，Edlén公式也会存在固有修正误差，其引入的不确定度为 $3\text{E-}08$ ， $k=2$ 。当测量位移为 1m 时，则：

$$u(\text{Edlen}) = 1 \times 10^{-8} \times 1\text{m} = 0.01\mu\text{m}$$

空气折射率修正引入的标准不确定度分量为：

$$u(n) = \sqrt{u(t)^2 + u(p)^2 + u(f)^2 + u(\text{inhom})^2 + u(\text{Edlen})^2} = 0.061\mu\text{m}$$

A.4.4 余弦误差引入的标准不确定度分量 $u(\theta)$

若标准激光干涉仪与被测激光干涉仪两者光轴之间夹角为 θ ，相应的余弦误差可表示为：

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

设光轴夹角不超过 $\pm 0.2 \text{ mrad}$ ，符合均匀分布，当测量位移为 1m 时，则：

$$u(\theta) = \frac{(0.2 \times 10^{-3})^2}{\sqrt{3}} \times 1\text{m} = 0.023\mu\text{m}$$

A.4.5 非线性误差引入的标准不确定度分量 $u(\text{non})$

设激光干涉仪非线性误差不超过 $\pm 5\text{nm}$ ，符合正态分布，则：

$$u(\text{non}) = \frac{5\text{nm}}{3} = 0.002\mu\text{m}$$

A.5 不确定度分量汇总表

不确定度分量汇总表见表A.1。

表A.1不确定度分量汇总表

不确定度分量 $u(x_i)$	不确定度分量来源	标准不确定度值 $u(x_i) / \mu\text{m}$
$u(Lr)$	标准激光干涉仪参考值引入的标准不确定度分量	0.03
$u(\lambda)$	激光波长误差引入的标准不确定度分量	0.01
$u(n)$	温度测量误差引入的标准不确定度分量 $u(t)$	0.03
	气压测量误差引入的标准不确定度分量 $u(p)$	0.009
	湿度测量误差引入的标准不确定度分量 $u(f)$	0.009
	空气分布不均匀引入的标准不确定度分量 $u(\text{inhom})$	0.05

	艾德伦公式引入的标准不确定度分量 $u(\text{Edlen})$	0.01
$u(\text{inhom})$	余弦误差引入的标准不确定度分量	0.023
$u(\text{non})$	非线性误差引入的标准不确定度分量	0.002

A.6 合成标准不确定度

表 A.1 中各分量互不相关，故合成标准不确定度为：

$$u_c = \sqrt{0.03^2 + 0.01^2 + 0.061^2 + 0.023^2 + 0.002^2} \mu\text{m} = 0.07\mu\text{m}$$

A.7 扩展不确定度 U

取包含因子 $k = 2$ ，则测量位移为 1m 时的扩展不确定度为：

$$U = k \times u_c = 2 \times 0.07\mu\text{m} = 0.14\mu\text{m}$$

附录 B

校准证书内容及内页格式

B.1 校准证书至少包括以下信息：

- a) 标题：“校准证书”；
- b) 实验室名称及地址；
- 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（生产厂家、型号规格及编号等）；
- g) 进行校准的日期；
- 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及有效性说明；
- j) 校准环境的描述：温湿度及气压的变化范围；
- 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) 复校时间间隔的建议；
- n) 校准证书签发人的签名、职务或等效标识；
- o) 校准结果仅对被校对象有效的声明；
- p) 未经实验室书面批准，不得部分复制证书的声明。

B.2 推荐的校准证书内页格式见表B.1。

中华人民共和国
国家计量技术规范
激光干涉仪校准规范
JJF××××—202×
国家市场监督管理总局发布