

中华人民共和国国家计量技术规范

JJF XXXX-XXXX

微位移传感器非线性测试技术规范

Testing Specification for Nonlinearity
of Micro-displacement Sensors

(征求意见稿)

XXXX-XX-XX 发布

XXXX-XX-XX 实施

国家市场监督管理总局 发布

微位移传感器非线性 测试技术规范

JJFXXXX-XXXX

Testing Specification for Nonlinearity
of Micro-displacement Sensors

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

参加起草单位：XXX

XXX

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：

吴金杰（中国计量科学研究院）

参加起草人：

XXX

XXX

XXX

目 录

引 言.....	II
1 范围.....	1
2 引用文件.....	1
3 术语和计量单位.....	1
3.1 微位移传感器 micro-displacement sensor.....	1
3.2 非线性 nonlinearity.....	1
4 概述.....	1
5 技术特性.....	2
5.1 非线性.....	2
6 测试条件.....	2
6.1 环境条件.....	2
6.2 测试项目及测试用的标准器.....	2
7 测试项目和测试方法.....	2
7.1 测试前准备.....	2
7.2 非线性.....	3
8 测试结果表达.....	3
9 复测时间间隔.....	3
附录 A.....	4
附录 B.....	6

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》、JJF 1059.1—2012《测量不确定度评定与表示》共同构成支撑本校准规范制定的基础性系列规范。

本规范为首次发布。

微位移传感器非线性测试技术规范

1 范围

本规范适用于微位移传感器的非线性测试。

2 引用文件

本规范参考了下列文件：

JJG 739-2005 激光干涉仪

JJF 1305-2011 线位移传感器校准规范

JJF 1682-2017 光栅式测微仪校准规范

JJF 1944-2021 电容式测微仪校准规范

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

下列术语和定义适用于本规范。

3.1 微位移传感器 micro-displacement sensor

分辨力小于 0.1 微米的线位移传感器。

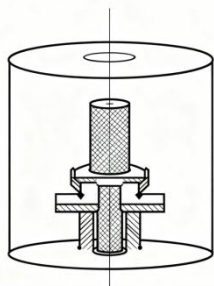
3.2 非线性 nonlinearity

传感器实际输出特性偏离理想线性模型的程度。

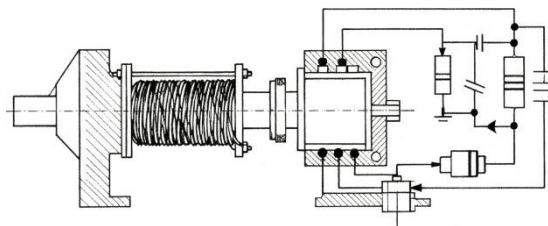
4 概述

微位移传感器用于测量微米乃至纳米级微小位移、形变、振动等长度尺寸，具有极高分辨率、稳定性及抗干扰能力等特点，常应用于精密制造业、自动化控制、生物医学及航空航天等领域。

典型线位移传感器的结构示意简图如图 1~图 4。



(a) 电容式



(b) 电感式

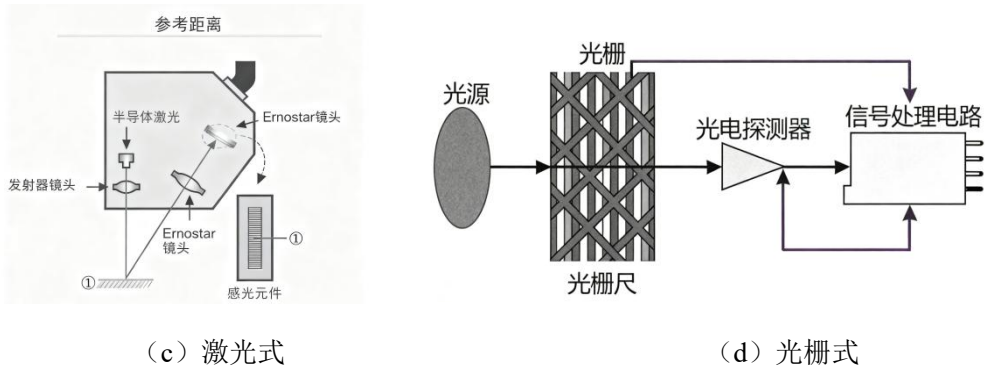


图 1 典型微位移传感器示意简图

5 技术特性

5.1 非线性

典型微位移传感器计量特性见表 1，性能指标供校准时参考。

表 1 典型微位移传感器计量特性

序号	传感器类型	非线性
1	电容式微位移传感器	$\pm 0.02\%$
2	电感式微位移传感器	$\pm 0.05\%$
3	光栅式微位移传感器	$\pm 0.1\%$
4	激光式微位移传感器	$\pm 0.1\%$

注：由于校准工作只给出测量结果，不判断合格与否，上述计量特性仅供参考。实际计量特性参考制造厂商技术要求。

6 测试条件

6.1 环境条件

- a) 温度：(20±0.2) °C，温度稳定性：每小时变化量不超过 0.1°C。
- b) 相对湿度：≤65%。

6.2 测试项目及测试用的标准器

微位移传感器测试项目和测试用标准器见表 2。允许采用满足测量不确定度要求的其它测量标准器。

表 2 测试微位移传感器非线性的主要设备

序号	校准项目	计量设备及	技术要求
1	非线性	测长装置：	MPE：± (A+1.5×10 ⁻⁶ L) 工作台移动角晃动<5"

注：A 为测长装置位移非线性，其至少不大于被测传感器技术指标的 1/3。

7 测试项目和测试方法

7.1 测试前准备

测试前，按仪器说明书要求设置相关参数，并进行预热。在确保没有影响校准计量特性的因素后方可进行校准。

7.2 非线性

微位移传感器的安装尽量满足阿贝原则，减小微位移传感器与测长装置之间的不同轴或者倾斜引入的非线性误差。调整传感器与测长装置的位置关系，保证始终位于传感器测量范围内。以传感器的起始测量位置为原点，移动测长装置，直到传感器的终点测量位置，移动过程中同步记录下测长装置示值 x 和传感器示值 y 。重复测量 5 次以上。

测长装置示值 x 和传感器示值 y 之间的 k 阶多项式方程可以表示为：

$$y = A_0 + A_1x + A_2x^2 + A_3x^3 + \cdots + A_kx^k \quad (1)$$

根据公式 (1) 可以构建矩阵方程，如下所示：

$$\begin{bmatrix} 1 & x_1 & x_1^2 & \cdots & x_1^k \\ 1 & x_2 & x_2^2 & \cdots & x_2^k \\ 1 & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & x_n & x_n^2 & \cdots & x_n^k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_0 \\ A_1 \\ \vdots \\ A_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中： x_{ij} —第 i 次实验传感器的第 j 个示值，nm；

x_{ij} —第 i 次实验传感器的第 j 个示值，nm；

h_0 —标准片中心点厚度标准值， μm 。

采用最小二乘拟合方式求取 k 阶多项式方程的系数。

$$\begin{bmatrix} A_0 \\ A_1 \\ \vdots \\ A_k \end{bmatrix} = (x^T x)^{-1} x^T y \quad (3)$$

得到非线性曲线方程：

$$e = A_2x^2 + A_3x^3 + \cdots + A_kx^k \quad (4)$$

将曲线极大点与极小点相减，得到微位移传感器的非线性。

8 测试结果表达

经过测试的微位移传感器出具测试证书，测试证书的内容即内页格式见附录 A。

9 复测时间间隔

由于复测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，因此送测单位可根据实际使用情况自主决定复测时间间隔，建议复测时间间隔为 1 年。

附录 A

测试证书内容及内页格式

A.1 测试证书至少包括以下信息：

- a) 标题：“测试证书”；
- b) 实验室名称和地址；
- c) 进行测试的地点（如果于实验室的地址不同）；
- 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) 被测试对象的描述和明确标识（生产厂家、型号规格及编号等）；
- g) 进行测试的日期；
- h) 测试所依据的技术规范的标识，包括名称及代号；
- i) 本次测试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) 测试结果及其测量不确定度的说明；
- l) 对测试规范的偏离的说明；
- m) 复测时间间隔的建议；
- n) 测试证书签发人的签名、职务或等效标识；
- o) 测试结果仅对被测试对象有效的声明；
- p) 未经测试实验室书面批准，不得部分或全部复制测试证书。

A.2 推荐的测试证书内页格式见表A.1

表A.1 测试证书内页格式

证书编号:

测试所依据的技术规范(代号、名称)				
测试环境条件及地点:				
温度:		地点:		
湿度:		其他:		
测试使用的计量(基)标准装置或主要标准器				
名称	测量范围	不确定度/准确度等级/ 大允许误差	证书编号	证书有效期至
测试结果:				
序号	校准项目	测量结果 nm	测量不确定度 ($k=2$) nm	
1	非线性			
<div>1. 本证书所列测试结果均可溯源至复现 SI 单位的中国国家计量基准。</div> <div>2. 测试结果不确定度的评定与表示均符合 JJF 1059.1 的要求。</div> <div>根据客户要求和测试文件的规定，通常情况下建议__个月测试一次。</div>				

附录 B

微位移传感器非线性测试结果的不确定度评定示例

B1 测量方法

微位移传感器非线性是通过测长装置进行测试的。测长装置主要由激光干涉仪和微位移运动台组成。将微位移传感器与激光干涉仪同轴安装，微位移运动台连续运动，同步记录激光干涉仪与微位移传感器的示值。根据 7.2 对数据进行处理，得到微位移传感器非线性测试结果。

下面以量程 100 μm ，非线性 0.05% 的传感器校准为例，进行其测量不确定度评定。

B2 测量模型

按微位移传感器非线性测试方法，非线性 l_i 按公式 (B.1) 进行计算：

$$\Delta l = l - l_0 \quad (\text{B.1})$$

式中： l —微位移传感器去除斜率之后的读数值；

l_0 —激光干涉仪去除斜率之后的读数值。

B3 灵敏系数与合成标准不确定度

不确定度来源包括测量读数重复性引入的不确定度分量，测长装置的示值误差引入的不确定度分量，测长装置工作台移动角摆引起的不确定度分量基环境温度变化引起的不确定度分量。

B.3.1 灵敏系数

微位移传感器和激光干涉仪的测量读数示值相互独立，所以

$$\text{灵敏系数 } c_i: c_1 = \frac{\partial \Delta l}{\partial l_i} = 1, c_2 = \frac{\partial \Delta l}{\partial l_0} = -1$$

B.3.2 合成标准不确定度

令 u_1 与 u_2 分别表示 l 和 l_0 的标准不确定度，则合成标准不确定度 u_c 为：

$$u_c^2 = c_1^2 \cdot u_1^2 + c_2^2 \cdot u_2^2 = u_1^2 + u_2^2 \quad (\text{B.2})$$

B4 标准不确定度分量一览表

表 B.1 不确定度评定一览表

标准不确定度分量 u_i	不确定度来源	灵敏系数	标准不确定度	说明
u_1	微位移传感器重复性引入不确定度分量	1	2.3nm	用 A 类方法进行评

				定
u_2	激光干涉仪引入不确定度	1	20.1nm	用 B 类方法评定

B5 标准不确定度分量的计算

B.5.1 微位移传感器重复性引起的不确定度分量 u_1

微位移传感器的测量重复性引入的不确定度分量，在相同条件下，可通过 6 次连续重复测量，按贝塞尔公式计算其实验标准偏差得到。

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (\text{B.3})$$

根据微位移传感器的测量重复性，则该项不确定度分量为 50nm。

$$u_1 = \frac{5}{\sqrt{5}} = 2.3\text{nm}$$

B.5.2 测长装置引入的不确定度分量 u_2

B.5.2.1 测长装置示值误差引入的不确定度分量 u_{21}

采用最大允许误差为 $\pm (20\text{nm} + 1.5 \times 10^{-6}L)$ 的测长装置进行校准，服从均匀分布，引入的不确定度分量为 20nm。

$$u_{21} = 20\text{nm}$$

B.5.2.2 测长装置角摆引入的不确定度分量 u_{22}

测长装置工作台移动角晃动不超过 $2.4 \times 10^{-5}\text{rad}(5'')$ 。在进行测试时，需要将传感器与测长装置同轴安装，服从均匀分布，传感器测量轴线与测长装置测量轴线的间距为 0.2mm 时，不确定度分量为：

$$u_{11} = 0.5 \times 0.2 \times 1.4 \times 10^{-5} = 1.4\text{nm} \quad (\text{B.3})$$

B.5.1.3 温度漂移引入的不确定度分量 u_{23}

在测量过程中温度变化等引起示值变化漂移等，服从均匀分布，引入的不确定度分量为。

$$u_{23} = \frac{2\text{nm}}{\sqrt{3}} = 1.2\text{nm} \quad (\text{B.3})$$

B6 合成标准不确定度 u_c

u_1 、 u_2 相互独立，接近似正态分布考虑，合成标准不确定度：

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2} = 20.2\text{nm}$$

B7 扩展不确定度

取包含 $k=2$ ，则相对扩展不确定度为：

$$U = 2 \cdot u_c = 2 \times 20.2 = 40.2\text{nm}$$

中华人民共和国
国家计量技术规范
XXXXXXXXXX 校准规范
JJFXXXX—XXXX
国家市场监督管理总局发布