

中华人民共和国国家计量技术规范

JJF XXXX-XXXX

零差相位比对法反射光栅校准规范

Calibration Specification for Reflection Gratings by

Homodyne Phase Comparison Method

(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

零差相位比对法反射光栅 校准规范

JJF XXXX-XXXX

Calibration Specification for Reflection Gratings by Homodyne
Phase Comparison Method

归口单位：全国几何量长度计量技术委员会

主要起草单位：同济大学

中国计量科学研究院

西安交通大学

参加起草单位：中国航空工业集团公司北京长城计量测试

技术研究所

上海市计量测试技术研究院

中国电子科技集团公司第十三研究所

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 术语和计量单位	1
4 概述	2
5 计量特性	2
5.1 平均间距	2
5.2 二维反射光栅正交性	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	4
7.1 一维反射光栅平均间距	4
7.2 二维反射光栅平均间距	5
7.3 二维反射光栅正交性	6
8 校准结果表达	6
9 复校时间间隔	7
附录 A	8
附录 B	14
附录 C	19

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。

零差相位比对法反射光栅校准规范

1 范围

本规范适用于平均间距为（200~8000）nm 的反射光栅的校准。

2 引用文件

本规范引用了下列文件：

JJF 1967 – 2022 激光衍射法反射光栅校准规范

IEC/TS 62622:2012 纳米技术 – 人工光栅的描述、测量及尺寸质量参数
(Nanotechnologies – Description, measurement and dimensional quality parameters of artificial gratings)

3 术语和计量单位

3.1 光栅 grating

一种通过表面精细的、相互平行的、等距的周期性的、相同的结构，使入射光的振幅或相位（或两者同时）受到周期性空间调制，从而产生衍射光的光学器件。

3.2 反射光栅 reflection grating

入射光与衍射光在光栅工作面同一侧的衍射光栅。

3.3 间距 pitch

光栅上相邻结构之间的距离。一般用结构的中心距确定间距，有些情况下也可以用结构的边界确定。单位为 nm。

3.4 平均间距 mean pitch

由光栅上多个间距确定的间距的平均值。单位为 nm。

3.5 利特罗结构 Littrow configuration

反射光栅衍射时，衍射光与入射光重合时的光路结构。

3.6 利特罗角 Littrow angle

当反射光栅的衍射光与入射光重合时的衍射角。

3.7 光栅标准物质

间距具有足够均匀和稳定的特定特性的光栅。

3.8 零差相位比对法 homodyne phase comparison method

使用单频激光的零差光学构型获取标准光栅和待测反射光栅在相同位移内产生的相位，并根据标准光栅间距计算待测反射光栅间距的测量方法。

4 概述

光栅作为一种核心光学元件，凭借其独特的衍射特性，在光学领域里常被用作精密的分光器件，广泛应用于单色仪和光谱仪等设备中。在纳米几何量计量领域，光栅的价值在于其间距的高度均匀性和稳定性，使其成为理想的传递标准，常用于校准各类显微镜的放大倍数。

一维光栅标准物质和二维光栅标准物质典型结构图如下图 1 所示。一维光栅标准物质结构由大量等距、平行排列的直线刻槽组成，形成规则的周期性线条结构。二维光栅标准物质结构则由在平面上等距规则排布的点阵结构组成，呈现网格状或阵列式的周期性特征。

零差相位比对法中，待测反射光栅干涉仪与标准光栅干涉仪都使用零差的光路构型且分别输出一组正弦余弦信号。待测反射光栅和标准光栅产生相同位移时，同步采集其正弦余弦信号，并进行反正切计算该位移下产生的相位。根据待测反射光栅和标准光栅之间的比值及标准光栅间距即可测算出待测反射光栅间距。

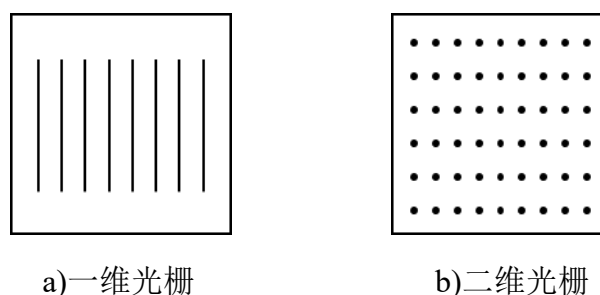


图 1 光栅标准物质典型结构示例

5 计量特性

5.1 平均间距

测量范围：(200 nm~8000) nm。

5.2 二维反射光栅正交性

反射光栅行方向结构阵列与列方向结构阵列之间的夹角

6 校准条件

6.1 环境条件

6.1.1 温度

(20±1)°C，校准过程中温度波动应≤0.1°C/h

6.1.2 湿度

(50%±10%)，校准过程中相对湿度波动应≤5%。

无明显振动。

6.2 测量标准及其他设备

校准计量器具主要为国家标准物质，推荐光栅标准物质如表 1 所示。

表 1 校准用光栅标准物质推荐表

国家标准 物质编号	标准物质名称	光栅间距/nm	不确定度/nm
GBW13956	扫描探针显微镜和扫描电子显微镜用一维纳米栅格标准物质	400.5	2.7
GBW13982	一维铬纳米光栅标准物质	212.8	1.1
GBW(E)130762	一维纳米栅格标准物质 (200nm)	200.8	0.9
GBW(E)130695	二维交叉型纳米栅格标准物质	X: 1000 Y: 1000	X: 4.9 Y: 4.9
GBW(E)130696	二维交叉型纳米栅格标准物质	X: 2000 Y: 2000	X: 7.2 Y: 7.2
GBW(E)130697	二维分离型纳米栅格标准物质	X: 500 Y: 500	X: 3.2 Y: 3.2
GBW(E)130765	二维分离型纳米栅格标准物质 (200nm)	X: 200.8 Y: 200.7	X: 1.0 Y: 1.0
GBW(E)130766	二维正交型纳米栅格标准物质 (200nm)	X: 200.7 Y: 200.1	X: 1.1 Y: 1.1
GBW(E)130838	二维铬纳米栅格标准物质	X: 212.8 Y: 212.8	X: 0.6 Y: 0.5

校准时所用的标准器以及其技术要求如下表 2 所示。

表 2 标准器及技术要求

标准器	技术要求
光栅干涉仪	位移测量不确定度 $U_L \leq 10\text{nm} + 7 \times 10^{-4}L$, $k=2$

表 2(续) 标准器及技术要求

位移台	全行程范围内线性度 $l \leq 4 \times 10^{-4}$ ，线性度不确定度 $U_l \leq 9 \times 10^{-5}$ ， $k=2$
位移数据采集系统	同步采样频率不小于 250kHz，不确定度 $U \leq 1 \times 10^{-7}$ ， $k=2$

7 校准项目和校准方法

7.1 一维反射光栅平均间距

测量范围限定在激光光斑所能覆盖的区域，根据该原理确定测量区域。若激光光斑无法覆盖校准要求的整个区域，则需选择多个位置进行测量。每个位置进行 5 次重复测量，得到该位置的间距平均值。随后，将所有测量位置的间距平均值再次取平均，得到待测反射光栅指定区域的间距平均值。选定测量区域时，应选择具有代表性的光栅区域。

校准装置如图 2 所示。将待测反射光栅与标准光栅安装在位移台上，确保两光栅的测量轴与位移台运动轴平行。标准光栅干涉仪的激光束以利特罗角入射到标准光栅上，其衍射光沿原光路返回。驱动位移台运动时，零差构型的待测反射光栅干涉仪和标准光栅干涉仪分别产生两束正弦余弦信号 $S_{n,\sin}$ 、 $S_{n,\cos}$ 、 $S_{s,\sin}$ 、 $S_{s,\cos}$ ，四路信号输入数据采集系统并被同步采样。

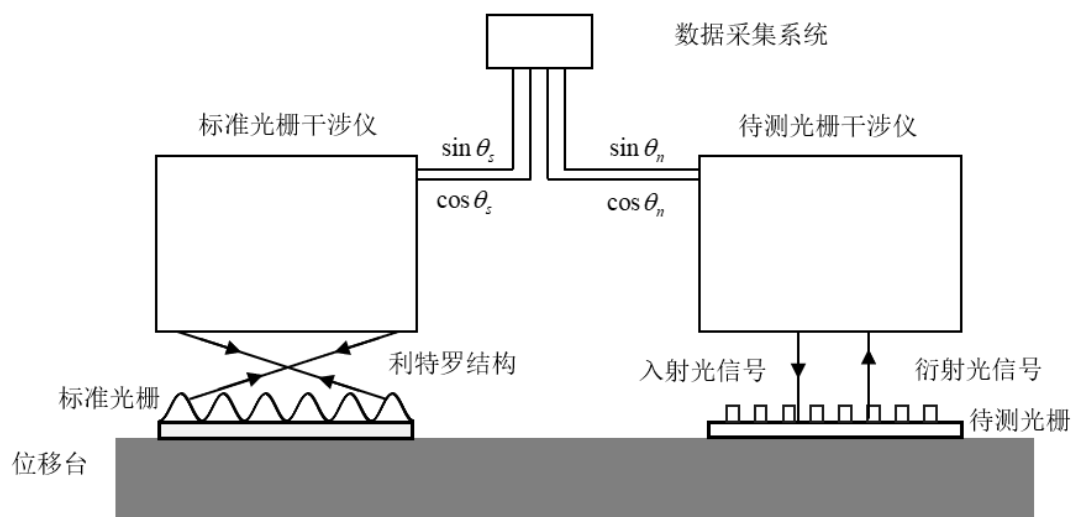


图 2 零差相位比对法反射光栅校准系统

单次测量下的光栅间距计算公式见公式 (1)。

$$d_n = k_0 d_s \quad (1)$$

斜率 k_0 的计算公式如下：

$$k_0 = \frac{\phi_s}{\phi_n} = \frac{S_{yy} - \delta S_{xx} + \sqrt{(S_{yy} - \delta S_{xx})^2 + 4\delta S_{xy}^2}}{2S_{xy}} \quad (2)$$

式中：

d_n ——待测反射光栅间距，nm；

d_s ——标准光栅间距，nm；

ϕ_s ——标准光栅的多普勒相位，rad，由式（3）确定。

$$\phi_s = \arctan\left(\frac{S_{s,\sin}}{S_{s,\cos}}\right) \quad (3)$$

$S_{s,\sin}$ ——标准光栅的测量正弦信号；

$S_{s,\cos}$ ——标准光栅的测量余弦信号；

ϕ_n ——待测反射光栅的多普勒相位，rad，由式（4）确定。

$$\phi_n = \arctan\left(\frac{S_{n,\sin}}{S_{n,\cos}}\right) \quad (4)$$

$S_{n,\sin}$ ——待测反射光栅的测量正弦信号；

$S_{n,\cos}$ ——待测反射光栅的测量余弦信号；

k_0 ——待测反射光栅与标准光栅的相位比值，其中 $S_{xx} = \sum(\phi_n - \bar{\phi}_n)^2$ ， $S_{yy} = \sum(\phi_s - \bar{\phi}_s)^2$ ，

$S_{xy} = \sum(\phi_n - \bar{\phi}_n)(\phi_s - \bar{\phi}_s)$ ， $\delta \approx \frac{d_s^2}{d_n^2}$ ，其中 d_n 为待测反射光栅的标称值，若待测反射光栅无

标称值则 $\delta = 1$ 。

对光栅上同一位置光栅间距的校准应以多次光栅间距测量结果的平均值来报告，其计算公式见公式（5）：

$$\bar{d}_n = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N d_{ni} \quad (5)$$

式中：

N ——重复测量次数， $N \geq 5$ 。

7.2 二维反射光栅平均间距

二维反射光栅的平均间距测量方法与 7.1 所述一维反射光栅平均间距的测量方法相同。但是，需分别测量行方向间距 d_x 和列方向间距 d_y 。

按照 7.1 所述方法安装待测反射光栅和标准光栅，并调整其姿态，令待测反射光栅上点阵或线阵的行方向、标准光栅测量方向及位移台运动轴方向平行。按 7.1 所示方法计算行方向光栅间距 d_x 。然后，将待测反射光栅绕其法线方向转动，使待测反射光栅上点阵或线阵的列方向和标准光栅测量方向与位移台运动轴方向平行。按 7.1 所示方法计算列方向光栅间距 d_y 。

7.3 二维反射光栅正交性

测量二维反射光栅正交性时，需分别测量二维反射光栅行方向间距 d_x 、列方向间距 d_y 和对角线方向间距 d_{xy} 。 d_x 和 d_y 的测量方法与 7.2 所述方法相同。测量对角线方向间距 d_{xy} 时，需将待测反射光栅绕其法线方向转动，直至对角线方向、标准光栅测量方向及位移台运动轴方向平行。按 7.1 所示方法计算对角线方向光栅间距 d_{xy} 。

二维反射光栅正交性 κ 可通过如图 1b) 所示的行、列方向间距 d_x 和 d_y ，以及对角线方向间距 d_{xy} 计算得到，见公式 (6)：

$$\kappa = \arccos \left[\frac{d_x d_y}{2} \left(\frac{1}{d_x^2} + \frac{1}{d_y^2} - \frac{1}{d_{xy}^2} \right) \right] \quad (6)$$

8 校准结果表达

校准结果应在校准证书上反映，校准证书应至少包括以下信息：

- a) 标题，如“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) 证书或报告的唯一性标识（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) 如果与校准结果的有效性和应用有关时，应对被校样品的抽样程序进行说明；
- i) 校准所依据的技术规范的标识，包括名称及代号；

-
- j) 本次校准所用测量标准的溯源性及有效性说明;
 - k) 校准环境的描述;
 - l) 校准结果及其测量不确定度的说明;
 - m) 对校准规范偏离的说明 (若有);
 - n) 校准证书或校准报告签发人的签名、职务或等效标识、以及签发日期;
 - 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。

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。建议复校时间间隔为 1 年。

附录 A

测量不确定度评定示例

附录 A 给出了反射光栅上单一位置间距的不确定度评定方法，以及二维反射光栅正交性不确定度评定方法。零差相位比对法测量反射光栅间距的不确定度来源主要影响因素为标准光栅和待测反射光栅的相位比值误差、标准光栅间距的不确定度、标准光栅热膨胀系数、标准光栅与待测反射光栅热膨胀系数差值、标准光栅与待测反射光栅之间的温差、待测反射光栅与标准环境的温差、标准光栅和待测反射光栅安装的余弦误差引起的误差。

A.1 一维反射光栅平均间距的不确定度评定

A.1.1 测量模型

由于本校准规范属于纳米长度校准方面，考虑一切可能的误差来源，以 212.8nm 光栅标准物质和电子束直写光栅作为待测反射光栅，测量数学模型如下：

$$d_n = k_0 d_s \frac{(1 + \alpha_s \Delta t_s)}{(1 + \alpha_n \Delta t_n)} \varepsilon = k_0 d_s (1 - \alpha_s \delta t - \delta \alpha \Delta t_n) \varepsilon \quad (\text{A.1})$$

式中：

k_0 ——标准光栅和待测反射光栅的相位比值；

d_s ——标准光栅的间距，nm；

d_n ——待测反射光栅的间距，nm；

α_n ——待测反射光栅的热膨胀系数， $^{\circ}\text{C}^{-1}$ ；

α_s ——标准光栅的热膨胀系数， $^{\circ}\text{C}^{-1}$ ；

Δt_n ——待测反射光栅和标准环境 20 $^{\circ}\text{C}$ 的偏差， $^{\circ}\text{C}$ ；

Δt_s ——标准光栅和标准环境 20 $^{\circ}\text{C}$ 的偏差， $^{\circ}\text{C}$ ；

$\delta \alpha$ ——待测反射光栅和标准光栅的热膨胀系数之差， $^{\circ}\text{C}^{-1}$ ；

δt ——待测反射光栅和标准光栅之间的温差， $^{\circ}\text{C}$ ；

ε ——标准光栅和待测反射光栅安装角余弦值；

A.1.2 灵敏系数和合成方差

从式 A.1 各个不确定度来源的变量进行偏导数计算获得灵敏系数 c_i ：

$$c_1 = \frac{\partial d_n}{\partial k_0} = d_s(1 - \alpha_s \delta t - \delta \alpha \Delta t_n) \varepsilon, \quad c_2 = \frac{\partial d_n}{\partial d_s} = k_0(1 - \alpha_s \delta t - \delta \alpha \Delta t_n) \varepsilon, \quad c_3 = \frac{\partial d_n}{\partial \alpha_s} = -k_0 d_s \delta t \varepsilon,$$

$$c_4 = \frac{\partial d_n}{\partial \delta t} = -k_0 d_s \alpha_s \varepsilon, \quad c_5 = \frac{\partial d_n}{\partial \delta \alpha} = -k_0 d_s \Delta t_n \varepsilon, \quad c_6 = \frac{\partial d_n}{\partial \Delta t_n} = -k_0 d_s \Delta t_n \delta \alpha \varepsilon,$$

$$c_7 = \frac{\partial d_n}{\partial \varepsilon} = k_0 d_s(1 - \alpha_s \delta t - \delta \alpha \Delta t_n)$$

用 $u(k_0)$ 、 $u(d_s)$ 、 $u(\alpha_s)$ 、 $u(\delta t)$ 、 $u(\delta \alpha)$ 、 $u(\Delta t_n)$ 、 $u(\varepsilon)$ 分别表示式 A.1 各个误差来源的标准不确定度，因这 7 个量相互独立，其合成方差 $u_c^2(d_n)$ 可以表示为：

$$u_c^2(d_n) = c_1^2 u^2(k_0) + c_2^2 u^2(d_s) + c_3^2 u^2(\alpha_s) + c_4^2 u^2(\delta t) + c_5^2 u^2(\delta \alpha) + c_6^2 u^2(\Delta t_n) + c_7^2 u^2(\varepsilon) \quad (\text{A.2})$$

式中：

$u(k_0)$ ——标准光栅和待测反射光栅相位比值标准不确定度；

$u(d_s)$ ——标准光栅间距标准不确定度；

$u(\alpha_s)$ ——标准光栅的热膨胀系数标准不确定度；

$u(\delta t)$ ——待测反射光栅和标准光栅之间的温差标准不确定度；

$u(\delta \alpha)$ ——待测反射光栅和标准光栅的热膨胀系数之差标准不确定度；

$u(\Delta t_n)$ ——待测反射光栅和标准环境 20°C 的偏差标准不确定度；

$u(\varepsilon)$ ——标准光栅和待测反射光栅安装角余弦值标准不确定度；

A.1.3 合成标准不确定度

$$u_c(d_n) = \sqrt{c_1^2 u^2(k_0) + c_2^2 u^2(d_s) + c_3^2 u^2(\alpha_s) + c_4^2 u^2(\delta t) + c_5^2 u^2(\delta \alpha) + c_6^2 u^2(\Delta t_n) + c_7^2 u^2(\varepsilon)} \quad (\text{A.3})$$

A.1.4 扩展不确定度

$$U = k u_c(d_n), \quad k=2 \quad (\text{A.4})$$

A.2 计算示例

本示例给出零差相位比对法下待测反射光栅 3mm 区域范围内的平均间距测量结果的不确定度评定。本示例中使用一维铬纳米光栅标准物质作为标准光栅，其在标准环境 20°C 间距 $d_s = 212.7771 \pm 0.0008 \text{ nm}$ ， $k=2$ 。本实例在相同实验环境的同一待测反射光栅位置区域测得十次相位比值分别为：18.79823, 18.79822, 18.79822, 18.79822, 18.79822, 18.79823, 18.79822, 18.79822, 18.79823 18.79822，平均值为 18.79822。本示例中使用的一维铬纳米光栅标准物质和待测反射光栅热膨胀系数分别为 $\alpha_s = 0.05 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ 和 $\alpha = 5.5$

$\times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ 。

A.2.1 标准光栅和待测反射光栅相位比值引入的标准不确定度分量 u_1

零差相位比对法中相位比值是标准光栅和待测反射光栅同步运动一段位移后产生的相位之间的比值，其不确定度数值是测量所得相位比值重复性所确定的实验标准差。由于本示例测得十次相位比值分别为：18.79823, 18.79822, 18.79822, 18.79822, 18.79822, 18.79823, 18.79822, 18.79822, 18.79823 18.79822，则计算得到标准不确定度为 $u(k_0)=9.34 \times 10^{-6}$ ， $k=2$ 。

则标准不确定度分量 $u_1=|c_1| u(k_0)=9.34 \times 10^{-6} \times d_s \varepsilon (1-\alpha_s \delta t - \delta \alpha \Delta t_n)/2$

A.2.2 标准光栅间距引入的标准不确定度分量 u_2

零差相位比对法反射光栅校准规范中使用光栅标准物质作为标准光栅，其光栅间距不确定度数值通常情况下从其技术指标或者溯源证书可以获得。本示例中使用一维铬纳米光栅作为标准光栅，在 20°C 下其光栅间距为 $d_s=212.7771 \pm 0.0008 \text{ nm}$ ， $k=2$ 。则标准光栅间距的标准不确定度为 $u(d_s)=0.0008 \text{ nm}$ ， $k=2$ 。

则标准不确定度分量 $u_2=|c_2| u(d_s)=0.0008 \text{ nm} \times k_0 \varepsilon (1-\alpha_s \delta t - \delta \alpha \Delta t_n)/2$ 。

A.2.3 标准光栅的热膨胀系数引入的标准不确定度分量 u_3

标准光栅基底材料为零膨胀玻璃，其热膨胀系数为 $\alpha_s=0.05 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ，最大测量误差为 $\pm 0.01 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ，并认为在该范围内矩形分布，故计算得到标准光栅的热膨胀系数的标准不确定度为 $u(\alpha_s)=\frac{0.01 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}}{\sqrt{3}} \approx 5.77 \times 10^{-8} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ 。

则标准不确定度分量 $u_3=|c_3| u(\alpha_s)=5.77 \times 10^{-8} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1} \times k_0 \varepsilon d_s \delta t$ 。

A.2.4 待测反射光栅和标准光栅之间的温差引入的标准不确定度分量 u_4

待测反射光栅和标准光栅应处于同一温度环境中，但实际存在温差，并以相等概率落在 $\pm 0.05^\circ\text{C}$ 区间内，按照均匀分布确定其标准不确定度为 $u(\delta t)=\frac{0.05^\circ\text{C}}{\sqrt{3}} \approx 0.03^\circ\text{C}$ 。

则标准不确定度分量 $u_4=|c_4| u(\delta t)=0.03^\circ\text{C} \times k_0 \varepsilon d_s \alpha_s$

A.2.5 待测反射光栅和标准光栅的热膨胀系数之差引入的不确定度 u_5

由于 α 和 α_s 相互独立，且热膨胀系数的变化界限为 $\pm 0.05 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ，满足矩形分布，则其标准不确定度为 $u(\delta \alpha)=\frac{0.05 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}}{\sqrt{3}} \approx 0.03 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ 。

则标准不确定度分量 $u_5=|c_5| u(\delta\alpha)=-0.03\times 10^{-6}\text{C}^{-1}\times k_0\varepsilon d_s\Delta t_n$ 。

A.2.6 待测反射光栅和标准环境 20°C 的偏差引入的标准不确定度分量 u_6

环境监测报告显示相较于 20°C 的标准环境值, $\Delta t=0.1^\circ\text{C}$, 其示值误差为 0.1°C , 满

足均匀分布, 则其标准不确定度为 $u(\Delta t_n)=\frac{0.1^\circ\text{C}}{\sqrt{3}}\approx 0.06^\circ\text{C}$

则标准不确定度分量 $u_6=|c_6| u(\Delta t_n)=-0.06^\circ\text{C}\times k_0\varepsilon d_s\delta\alpha$ 。

A.2.7 标准光栅和待测反射光栅安装角余弦值标准不确定度 u_7

零差相位比对法反射光栅校准示例中待测反射光栅和标准光栅的角度对准误差的

余弦值为 $\varepsilon=0.999990$, 符合均匀分布, 其标准不确定度为 $u(\varepsilon)=\frac{1-\varepsilon}{\sqrt{3}}\approx 5.49\times 10^{-6}$ 。

则标准不确定度分量 $u_7=|c_7| u(\varepsilon)=5.49\times 10^{-6}\times k_0d_s(1-\alpha_s\delta t-\delta\alpha\Delta t_n)$ 。

A.2.8 标准不确定度分量一览表

输入量的标准不确定度分量汇总表见表 A.1。

表 A.1 不确定度分量一览表

输入量	输入量的标准不确定度	灵敏系数	引入的标准不确定度分量 u_i
k_0	$9.34\times 10^{-6}/2$	$d_s\varepsilon(1-\alpha_s\delta t-\delta\alpha\Delta t_n)$	0.99pm
d_s	0.0008 nm/2	$k_0\varepsilon(1-\alpha_s\delta t-\delta\alpha\Delta t_n)$	7.5pm
α_s	$5.77\times 10^{-8}\text{C}^{-1}$	$-k_0\varepsilon d_s\delta t$	0.012pm
δt	0.03°C	$-k_0\varepsilon d_s\alpha_s$	0.006pm
$\delta\alpha$	$0.03\times 10^{-6}\text{C}^{-1}$	$-k_0\varepsilon d_s\Delta t_n$	0.012pm
Δt_n	0.06°C	$-k_0\varepsilon d_s\delta\alpha$	0.012pm
ε	5.49×10^{-6}	$k_0d_s(1-\alpha_s\delta t-\delta\alpha\Delta t_n)$	21.9pm

A.2.9 合成标准不确定度

$$u_c(d_n)=\sqrt{u_1^2+u_2^2+u_3^2+u_4^2+u_5^2+u_6^2+u_7^2}=23.2\text{pm} \quad (\text{A.5})$$

A.2.10 扩展不确定度

取包含因子 $k=2$, 则扩展不确定度为:

$$U=ku_c(d_n)=46.4\text{pm} \quad (\text{A.6})$$

A.3 二维反射光栅正交性的不确定度评定

A.3.1 测量模型

$$\kappa = \arccos \left[\frac{d_x d_y}{2} \left(\frac{1}{d_x^2} + \frac{1}{d_y^2} - \frac{1}{d_{xy}^2} \right) \right] \quad (\text{A.7})$$

式中：

d_x ——待测反射光栅行方向间距，nm；

d_y ——待测反射光栅列方向间距，nm；

d_{xy} ——待测光栅对角线方向间距，nm。

A.3.2 灵敏系数和合成方差

$$c_1 = \frac{\partial \kappa}{\partial d_x} = \frac{d_y}{2} \left(\frac{1}{d_x^2} - \frac{1}{d_y^2} + \frac{1}{d_{xy}^2} \right) \frac{1}{\sqrt{1 - \left[\frac{d_x d_y}{2} \left(\frac{1}{d_x^2} + \frac{1}{d_y^2} - \frac{1}{d_{xy}^2} \right) \right]^2}}$$

$$c_2 = \frac{\partial \kappa}{\partial d_y} = \frac{d_x}{2} \left(\frac{1}{d_x^2} - \frac{1}{d_y^2} - \frac{1}{d_{xy}^2} \right) \frac{-1}{\sqrt{1 - \left[\frac{d_x d_y}{2} \left(\frac{1}{d_x^2} + \frac{1}{d_y^2} - \frac{1}{d_{xy}^2} \right) \right]^2}}$$

$$c_3 = \frac{\partial \kappa}{\partial d_{xy}} = \frac{d_x d_y}{d_{xy}^3}$$

各输入量的标准不确定度通过 A.1 所述反射光栅间距不确定度评定方法得到，用 $u(d_x)$ 、 $u(d_y)$ 、 $u(d_{xy})$ 分别表示式 A.7 各个误差来源的标准不确定度。

各输入量的标准不确定度分量可以表示为 $u_1 = |c_1|u(d_x)$ ， $u_2 = |c_2|u(d_y)$ ， $u_3 = |c_3|u(d_{xy})$ 。

因这 3 个量相互独立，其合成方差 $u_c^2(\kappa)$ 可以表示为：

$$u_c^2(\kappa) = c_1^2 u^2(d_x) + c_2^2 u^2(d_y) + c_3^2 u^2(d_{xy}) = u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 \quad (\text{A.8})$$

式中：

$u(d_x)$ ——待测反射光栅行方向间距标准不确定度，nm；

$u(d_y)$ ——待测反射光栅列方向间距标准不确定度，nm；

$u(d_{xy})$ ——待测反射光栅对角线方向间距标准不确定度，nm；

A.3.3 合成标准不确定度

$$u_c(\kappa) = \sqrt{c_1^2 u^2(d_x) + c_2^2 u^2(d_y) + c_3^2 u^2(d_{xy})} = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2} \quad (\text{A.9})$$

A.3.4 扩展不确定度

$$U = k u_c(\kappa), \quad k = 2 \quad (\text{A.10})$$

A.4 计算示例

A.4.1 各输入量的标准不确定度

待测反射光栅行方向间距为 $d_x=3999.8730\text{nm}$ ，扩展不确定度为 $U=0.0015\text{nm}$ ， $k=2$ ，列方向间距为 $d_y=3999.8716\text{nm}$ ，扩展不确定度为 $U=0.0015\text{nm}$ ， $k=2$ ，对角线方向间距为 $d_{xy}=2828.3343\text{nm}$ ，扩展不确定度为 $U=0.0015\text{nm}$ ， $k=2$ 。

由式（A.7）计算得到 $\kappa=90.0001^\circ$ ，有 $u(d_x)=0.0232\text{nm}$ ， $u(d_y)=0.0232\text{nm}$ ， $u(d_{xy})=0.0232\text{nm}$

A.4.2 各输入量的灵敏系数

计算得到 $c_1=0.00025\text{nm}^{-1}$ ， $c_2=0.00025\text{nm}^{-1}$ ， $c_3=0.00071\text{nm}^{-1}$

A.4.3 各输入量的标准不确定度分量

计算得到 $u_1=5.8\times 10^{-6}\text{rad}$ ， $u_2=5.8\times 10^{-6}\text{rad}$ ， $u_3=1.64\times 10^{-5}\text{rad}$

A.4.4 合成标准不确定度

$$u_c(\kappa) = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2} = 1.84\times 10^{-5}\text{rad}=0.0011^\circ \quad (\text{A.11})$$

A.4.4 扩展不确定度

$$U = ku_c(\kappa) = 0.0022^\circ \quad (\text{A.12})$$

A.4.5 相对扩展不确定度

$$U_{rel} = 2.4\times 10^{-5}, \quad k = 2 \quad (\text{A.13})$$

附录 B

校准记录内容

零差相位比对法反射光栅间距校准原始记录

证书编号: _____
送测单位: _____ 送测时间: _____ 年 ____ 月 ____ 日
联系地址: _____
光栅名称: _____ 光栅型号: _____ 光栅编号: _____
制造商: _____ 外观检查: _____
校准地点: _____
环境温度: _____ °C 环境湿度: _____ % RH 气压: _____ Pa

校准所依据的技术规范 (名称、代号)

校准环境条件及地点:

温度: _____ °C 地点: _____
湿度: _____ %RH 其它: _____

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)

一维反射光栅间距校准原始记录

测量序号						
	斜率 k_0	光栅间距 $d_n(\text{nm})$	斜率 k_0	光栅间距 $d_n(\text{nm})$	斜率 k_0	光栅间距 $d_n(\text{nm})$
1						
2						
3						
4						
5						
6						
7						
8						
9						
10						
平均值						
标准差						
相对标准不确定度						
不确定度(nm)						

校准时间：_____年__月__日

测试员：_____ 核验员：_____

二维反射光栅间距校准原始记录

测量序号						
	斜率 k_0	行方向光栅间距 $d_x(\text{nm})$	斜率 k_0	行方向光栅间距 $d_x(\text{nm})$	斜率 k_0	行方向光栅间距 $d_x(\text{nm})$
1						
2						
3						
4						
5						
6						
7						
8						
9						
10						
平均值						
标准差						
相对标准不确定度						
不确定度(nm)						

测量序号						
	斜率 k_0	列方向光栅 间距 $d_y(\text{nm})$	斜率 k_0	列方向光栅 间距 $d_y(\text{nm})$	斜率 k_0	列方向光栅 间距 $d_y(\text{nm})$
1						
2						
3						
4						
5						
6						
7						
8						
9						
10						
平均值						
标准差						
相对标准 不确定度						
不确定 度(nm)						

测量序号						
	斜率 k_0	对角线方向 光栅间距 $d_{xy}(\text{nm})$	斜率 k_0	对角线方向 光栅间距 $d_{xy}(\text{nm})$	斜率 k_0	对角线方向 光栅间距 $d_{xy}(\text{nm})$
1						
2						
3						
4						
5						
6						
7						
8						
9						
10						
平均值						
标准差						
相对标准 不确定度						
不确定 度(nm)						

二维光栅正交性：_____ ($k=2$)

校准时间：_____年____月____日

测试员：_____ 核验员：_____

附录C

校准证书内页内容

校准结果

一维反射光栅：

1.仅测量反射光栅上一个位置的情况：

标准温度（20℃）时的平均间距：

$$d_n = \text{_____ nm}$$

备注：

测量时位移台的运动距离与待测反射光栅长度相等且全行程内标准光栅干涉仪和待测反射光栅干涉仪均正常输出正弦余弦信号。

2.测量反射光栅上多个位置的情况

选取反射光栅上 M 个位置，每个位置进行 N ($N \geq 5$) 次重复测量，标准温度（20℃）时光栅间距测量结果：

序号	测量值/nm	测量不确定度/nm
位置 1		
位置 2		
⋮	⋮	⋮
位置 M		

标准温度（20℃）时的平均值及不确定度：

$$d_n = \text{_____ nm } (k=2)$$

二维反射光栅:

1.标准温度(20℃)时的行方向间距:

$$d_x = \text{_____ nm } (k=2)$$

2.标准温度(20℃)时的列方向间距:

$$d_y = \text{_____ nm } (k=2)$$

3.二维反射光栅正交性

$$\kappa = \text{_____ nm } (k=2)$$

备注:

测量时位移台的运动距离与待测反射光栅长度相等且全行程内标准光栅干涉仪和待测反射光栅干涉仪均正常输出正弦余弦信号。

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:

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:

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