

DOI: 10.13382/j.jemi.B2205507

# 微纳测量机靶镜正交偏差角测量不确定度评定\*

黄强先<sup>1,2</sup> 张祖杨<sup>1,2</sup> 郭小倩<sup>1,2</sup> 陈志文<sup>1,2</sup> 李红莉<sup>1,2</sup> 程荣俊<sup>1,2</sup> 张连生<sup>1,2</sup>

(1. 合肥工业大学仪器科学与光电工程学院 合肥 230009;

2. 合肥工业大学测量理论与精密仪器安徽省重点实验室 合肥 230009)

**摘要:** 三维靶镜是微纳米坐标测量机系统中的重要组成部分,其各面间正交性对保障系统测量精度至关重要。为检验三维靶镜加工是否符合测量机精度要求,对三维靶镜正交偏差角进行测量及不确定度评定,在量值特性分析建模基础上,研究了测量不确定度表示指南传统方法(称为GUM法)、蒙特卡洛方法(MCM)及自适应蒙特卡洛方法(AMCM)3种测量评定方法。测量评定结果对比表明,三维靶镜加工精度基本符合预期要求,其中Z-X面和Y-Z面的面间夹角均为0.5"左右,X-Y面间夹角在3.3"左右;3种方法所得评定结果基本一致,MCM和AMCM较GUM法评定结果更合理,AMCM相对MCM更高效。所做工作作为后续研究微纳米坐标测量机面向任务的测量不确定度评定提供了借鉴方法。

**关键词:** 测量不确定度;坐标测量机;测量不确定度表示指南;蒙特卡洛方法;自适应蒙特卡洛方法

**中图分类号:** TB9;TN06 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** D410.55

## Measurement uncertainty evaluation of the orthogonal deviation angles of the target mirror of micro/nano measuring machine

Huang Qiangxian<sup>1,2</sup> Zhang Zuyang<sup>1,2</sup> Guo Xiaoqian<sup>1,2</sup> Chen Zhiwen<sup>1,2</sup>Li Hongli<sup>1,2</sup> Cheng Rongjun<sup>1,2</sup> Zhang Liansheng<sup>1,2</sup>

(1. School of Instrument Science and Optoelectronics Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;

2. Anhui Province Key Laboratory of Measuring Theory and Precision Instrument, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

**Abstract:** The 3D target mirror is a vital part of micro/nano coordinate measuring machine system. The orthogonality between its any two mirror planes is very important to ensure the measurement accuracy of the measuring machine system. In order to verify whether the 3D target mirror meets the accuracy requirement of the measuring machine, the orthogonal deviation angles of the 3D target mirror are measured and the measurement uncertainties are evaluated. On the basis of quantitative characteristic analysis and modeling, the traditional method (called as GUM method) given in the guide to the expression of uncertainty in measurement, Monte Carlo method (MCM) and adaptive Monte Carlo method (AMCM) are researched. The comparison of the measurement evaluation results shows that the 3D target mirror approximately meets the accuracy requirement of the measuring machine. The orthogonal deviation angles of Z-X mirror planes and Y-Z mirror planes are about 0.5", and the orthogonal deviation angle of X-Y mirror planes is about 3.3". The evaluation results obtained by the three methods are basically consistent. Moreover, MCM and AMCM are more reasonable than GUM, and AMCM method is more efficient than MCM method. This work provides reference methods for the task-oriented measurement uncertainty evaluation of micro/nano CMM.

**Keywords:** measurement uncertainty; coordinate measuring machine (CMM); GUM; MCM; AMCM

## 0 引言

三维靶镜是在研微纳米坐标测量机计量结构的重要组成部分<sup>[1-3]</sup>,其任意两面间正交性对测量机的测量精度

具有重大影响,在微纳米坐标测量机的研制中,要求三维靶镜的加工精度必须符合测量系统精度设计要求。目前,针对微纳米坐标测量机中三维靶镜反射面间正交偏差角的测量,Widdershoven等<sup>[1]</sup>提出了一种利用电容传感器对一方形标准件进行角度测量的方法来分离获取正

交偏差角;Ruijl<sup>[3]</sup>提出了一种利用四边形内角和 360°的原理对三维靶镜各面间正交偏差角分离的方法。这些测量方案相对比较复杂,且仅使用了传统的测量不确定度评定方法。

测量不确定度是评定测量结果质量的重要指标,将直接反映测量结果的可信度<sup>[4-5]</sup>。目前,现代产品检验、实验室认可都要求给出不确定度<sup>[6]</sup>。因此,要检验三维靶镜的加工精度是否符合测量系统精度设计要求,就需要对其正交偏差角进行测量及测量不确定度评定。该评定结果将决定三维靶镜是否可用于微纳米坐标测量机的研制,如果可用,对其测量评定的结果又将能够为后续针对靶镜正交偏差进行测量误差修正、为微纳米坐标测量机面向任务的测量不确定度评定提供重要理论依据和数据信息。

研究中利用自准直仪和精密回转工作台对靶镜反射面间正交偏差角进行测量<sup>[7]</sup>,给出一种较为简便且经济实用的测量方案;针对测量实验系统,采用量值特性分析方法确定测量系统的主要不确定度来源,建立不确定度评定相应测量模型,并分别采用传统的测量不确定度评定方法(简称为 GUM 法)、蒙特卡洛方法(MCM)和自适应蒙特卡洛方法(AMCM)进行测量不确定度评定,通过评定结果对比,验证三维靶镜的可用性,同时也总结了不同评定方法的应用特点,为后续的微纳米坐标测量机面向任务的测量不确定度评定研究奠定了基础。

## 1 靶镜正交偏差角度测量

### 1.1 测量方案

在研微纳米坐标测量机计量结构组成如图 1 所示,其中三维靶镜由 3 个平面反射镜粘接而成,能够反射激光光束,与布置在 X、Y、Z 三个测量方向的激光干涉仪组合实现三维精密测量。根据测量精度设计要求,所加工的三维靶镜各面间正交偏差角度应保证在 3"以内。为检验靶镜加工精度是否达到要求,首先需要搭建实验系统对靶镜正交偏差角度进行测量。根据实验室现有条件,利用 Nikon 6B 型自准直仪和 RPI 公司的 DP300 型精密回转工作台搭建实验系统对靶镜正交偏差角度进行测量,应用所提出的靶镜加工精度检验方法。

测量实验如图 2 所示,其中,自准直仪在 5'测量范围内测量精度可达±0.5",精密回转工作台通过计算机软件自动控制,其旋转精度可达±1",分辨率为 0.2"。

对靶镜反射面间正交偏差角进行测量的具体方案为:按图 2 所示初始位置摆放靶镜,使自准直仪正对 X 反射面中心位置,调整自准直仪至读数为 0 的位置,然后控制转台逆时针旋转 90°,待旋转完成后,对自准直仪进行读数并记录,该数据即为测得 X-Y 反射面间正交偏差角

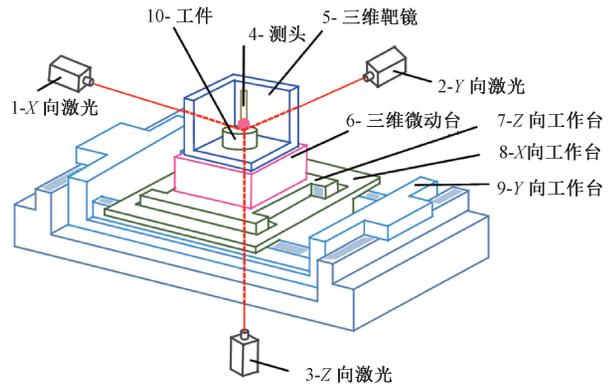


图 1 在研微纳米坐标测量机计量结构组成示意图  
Fig. 1 Schematic diagram of the measurement structure in the developing micro/nano coordinate measuring machine

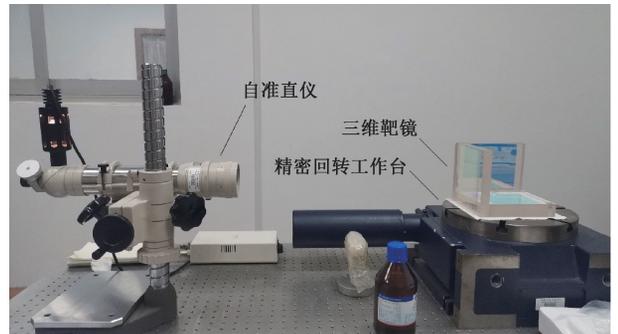


图 2 靶镜正交偏差角测量实验示意图  
Fig. 2 Schematic diagram of orthogonal deviation angle measurement experiment of the target mirror

$\theta_{xy}$ 。为了减小数据中存在的随机误差影响,在读数完成后,控制转台旋转至初始位置,重复上述测量步骤,完成 10 组重复测量。同理,调整靶镜的摆放位置,使得自准直仪分别正对 Z 反射面和 Y 反射面,测得值将分别对应 Z-X 反射面间夹角的正交偏差角  $\theta_{zx}$  和 Y-Z 反射面间夹角的正交偏差角  $\theta_{yz}$ , 同样进行 10 组重复测量。

### 1.2 测量实验数据

对应三维靶镜 3 个反射面的中心位置,对三维靶镜反射面间正交偏差角分别进行 10 次重复测量,测量数据分别如表 1、2、3 的第 1 组所示,当三维靶镜各面夹角大于 90°时,正交偏差角为正,反之为负。如果计算出其算数平均值,可近似得到对应测量点的靶镜反射面间正交偏差角,但以点代面缺乏合理性,因此,为了求解面间正交偏差角,需要在三维靶镜反射面上选取更多具有代表性的点位置进行测量,综合评估得出三维靶镜反射面间正交偏差角。考虑到三维靶镜反射面加工平面度小于  $\lambda/5$ ,整体形貌变化不大,将每个靶镜反射面均匀划分成

4 个独立区域,然后大致对应每个区域的中心点位置完成 10 次重复测量,所获测量数据如表 1、2、3 的第 2~5 组所示。最后综合表 1、2、3 所示的所有测量数据,分别将其对应的加权算数平均值<sup>[8]</sup>作为三维靶镜面间 3 个正交偏差角的最佳估计值。

考虑到在不同测量条件(如不同测量设备、不同测量

方法、不同观测者或者不同测量环境)下对同一被测量进行测量时的测量结果可能不一致<sup>[9]</sup>,因此在上述对靶镜反射面不同区域进行的重复测量实验中,通过改变测量区域与测试人员进行重复测量,也体现了对测量复现性的考察,为后续基于量值特性指标进行不确定度分析提供便利。

表 1 靶镜 X-Y 面间正交偏差角复现性测量数据

Table 1 Repeatability measurement data of orthogonal deviation angle between X-Y planes of target mirror

组别	测量次数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	偏差角 $\theta_{xy}$	-2.5"	-3.0"	-3.5"	-2.5"	-3.0"	-3.0"	-3.5"	-3.8"	-2.8"	-3.3"
2	偏差角 $\theta_{xy}$	-3.5"	-3.0"	-2.6"	-3.0"	-4.0"	-4.0"	-3.5"	-4.0"	-3.3"	-3.7"
3	偏差角 $\theta_{xy}$	-3.5"	-3.5"	-3.2"	-3.6"	-3.5"	-3.0"	-3.0"	-3.8"	-3.5"	-3.7"
4	偏差角 $\theta_{xy}$	-4.3"	-3.7"	-3.8"	-4.2"	-3.5"	-3.2"	-3.4"	-3.0"	-3.3"	-2.5"
5	偏差角 $\theta_{xy}$	-3.7"	-3.5"	-3.0"	-3.0"	-3.3"	-3.4"	-3.2"	-3.5"	-3.7"	-3.0"

表 2 靶镜 Z-X 面间正交偏差角复现性测量数据

Table 2 Repeatability measurement data of orthogonal deviation angle between Z-X planes of target mirror

组别	测量次数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	偏差角 $\theta_{zx}$	+0.5"	+0.7"	+0.5"	+0.4"	+0.7"	+0.5"	+0.5"	+0.4"	+0.7"	+0.6"
2	偏差角 $\theta_{zx}$	+0.6"	+0.9"	+0.7"	+0.5"	+0.6"	+0.3"	+0.5"	+0.8"	+0.6"	+0.3"
3	偏差角 $\theta_{zx}$	+0.8"	+0.5"	+0.5"	+0.4"	+0.4"	+0.8"	+0.5"	+0.7"	+0.5"	+0.5"
4	偏差角 $\theta_{zx}$	+0.6"	+0.8"	+0.7"	+0.6"	+0.8"	+0.6"	+0.8"	+0.7"	+0.8"	+0.6"
5	偏差角 $\theta_{zx}$	+0.2"	+0.3"	+0.6"	+0.2"	+0.5"	+0.8"	+0.7"	+0.8"	+0.4"	+0.6"

表 3 靶镜 Y-Z 面间正交偏差角复现性测量数据

Table 3 Repeatability measurement data of orthogonal deviation angle between Y-Z planes of target mirror

组别	测量次数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	偏差角 $\theta_{yz}$	+0.5"	+0.5"	+0.4"	+0.8"	+0.8"	+0.6"	+0.5"	+0.5"	+0.7"	+0.4"
2	偏差角 $\theta_{yz}$	+0.7"	+0.5"	0.0"	+0.6"	+0.5"	0.0"	+0.1"	+0.3"	0.0"	+0.3"
3	偏差角 $\theta_{yz}$	+0.4"	+0.3"	+0.3"	+0.5"	+0.5"	+0.6"	+0.4"	+0.5"	+0.7"	+0.4"
4	偏差角 $\theta_{yz}$	+0.3"	+0.5"	+0.6"	+0.8"	+0.5"	+0.5"	+0.4"	+0.7"	+0.8"	+0.3"
5	偏差角 $\theta_{yz}$	+0.5"	+0.3"	+0.5"	0.0"	+0.5"	+0.1"	+0.3"	+0.6"	+0.4"	+0.5"

根据测量不确定度表示指南,一个完整的测量结果应包含测量估计值和测量不确定度两个部分<sup>[5]</sup>。分别计算表 1、2、3 所有数据的加权算数平均值,可以得到靶镜 3 个正交偏差角的最佳估计值为:  $\theta_{xy} = -3.36"$ ,  $\theta_{zx} = +0.61"$ ,  $\theta_{yz} = +0.48"$ 。下面为了给出完整、可靠的测量结果,以检验三维靶镜的加工精度是否符合测量机设计要求,还需要对靶镜正交偏差角测量不确定度进行评定。

## 2 测量不确定度分析建模

在实际测量中,往往存在很多影响因素导致测量误差,需要根据实际测量情况具体分析,确定主要测量不确定度来源,一般可采用测量系统误差溯源或者量值特性指标来进行不确定度来源分析<sup>[10-11]</sup>。其中,量值特性分析法从被测量测量结果的量值特性指标出发分析不确定

度主要来源,相较于误差溯源方法更加客观、易于实施。本研究依据量值特性分析法来确定测量系统主要不确定度来源。

测量系统量值特性指标主要包括偏移、线性、稳定性、分辨力、重复性和复现性 6 项。在测量靶镜各面间正交偏差角时,通过对上述 6 项量值特性指标的分析,得出影响系统测量结果的主要不确定度来源包括:系统示值误差、环境温度变化、测量重复性和测量复现性。同时考虑到,如果环境温度变化时,靶镜为均匀膨胀,则其膨胀量不会改变其反射面间夹角的大小,也就不会对测量结果产生影响,故可忽略由环境温度变化引起的测量不确定度分量。因此,依据黑箱建模思想<sup>[12-14]</sup>,可建立靶镜正交偏差角测量模型:

$$\theta = \theta_0 + \delta_E + \delta_{RT} + \delta_{RD} \quad (1)$$

其中,  $\theta_0$  为测量结果的最佳估计值,  $\delta_E$  为系统示值

误差,  $\delta_{RT}$  为重复性误差,  $\delta_{RD}$  为复现性误差。

基于上述测量模型,本文中分别采用 GUM 法、MCM 法和 AMCM 法 3 种评定方法对靶镜正交偏差角的测量不确定度进行评定。

### 3 GUM 法评定

GUM 法基于方和根法来评定不确定度,一般适用于线性模型。依据 JJF 1 059. 1-2012《测量不确定度评定与表示》规范,其一般评定流程如图 3<sup>[5,9]</sup> 所示。

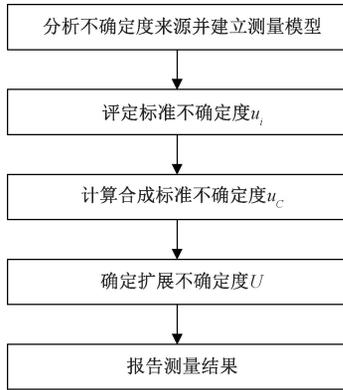


图 3 GUM 法评定流程

Fig. 3 Assessment process of GUM

根据实验测量数据,采用 GUM 法对靶镜正交偏差角进行测量不确定度评定的步骤为:

1) 基于量值特性分析法确定主要测量不确定度来源并建立靶镜正交偏差角的测量模型式(1)。

2) 假设系统示值误差  $\delta_E$ 、重复性误差  $\delta_{RT}$ 、复现性误差  $\delta_{RD}$  所引入的各标准不确定度分量  $u_E$ 、 $u_{RT}$ 、 $u_{RD}$  相互独立,则有合成标准不确定度:

$$u_c = \sqrt{u_E^2 + u_{RT}^2 + u_{RD}^2} \quad (2)$$

分别估计各不确定度分量  $u_E$ 、 $u_{RT}$ 、 $u_{RD}$  :

(1) 由系统示值误差引起的不确定度分量  $u_E$  包含了自准直仪示值误差和转台旋转精度的综合影响,其中自准直仪示值误差引起的不确定度分量  $u_{E1}$  在包含因子  $k = 2$  时,按 B 类评定估计可得  $u_{E1} = \frac{0.5''}{2} = 0.25''$ ; 由转台旋转精度引起的不确定度分量  $u_{E2}$  在包含因子  $k = 2$  时,按 B 类评定估计可得  $u_{E2} = \frac{1''}{2} = 0.50''$ 。则两者综合影响对应的标准不确定度分量:

$$u_E = \sqrt{u_{E1}^2 + u_{E2}^2} = 0.559'' \quad (3)$$

(2) 由测量重复性引起的不确定度分量

$$u_{RT} = \frac{1}{\sqrt{n}}\sigma = \frac{1}{\sqrt{10}} \cdot \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n v_i^2}{n-1}} \quad (4)$$

由贝塞尔公式:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n v_i^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\theta_i - \bar{\theta})^2}{n-1}} \quad (5)$$

其中,  $\theta_i$  表示第  $i$  个测量数据;  $\bar{\theta}$  表示重复实验所有  $n$  个测量数据的算术平均值,  $n = 10$ ;

(3) 测量复现性引起的不确定度分量  $u_{RD}$  可用多组测量平均值之间的实验标准差来确定:

$$u_{RD} = \sqrt{\frac{1}{m-1} \sum_{j=1}^m (\bar{\theta}_j - \bar{\theta})^2} \quad (6)$$

其中,  $\bar{\theta}_j$  表示复现性测量中第  $j$  组测量数据的平均值;  $\bar{\theta}$  表示  $m$  组复现性实验所有测量数据的算术平均值,  $m = 5$ 。

3) 根据式(2)计算靶镜正交偏差角的合成标准不确定度  $u_c$ 。

4) 由置信概率  $P = 95\%$  取包含因子  $k = 1.96$ , 由 GUM 法评定测量结果的扩展不确定度  $U$  为:

$$U = k \cdot u_c \quad (7)$$

由 1.2 节中测量数据,按上述评定步骤,分别代入式(4)、(5)、(6)、(2)、(7),可得评定结果如表 4 所示。

表 4 GUM 法评定结果

Table 4 Evaluation results of GUM method

偏差角	$u_E$	$u_{RT}$	$u_{RD}$	$u_c$	$U$
$\theta_{xy}$	0.559''	0.137''	0.191''	0.606''	1.188''
$\theta_{zx}$	0.559''	0.037''	0.072''	0.565''	1.107''
$\theta_{yz}$	0.559''	0.047''	0.113''	0.572''	1.121''

### 4 MCM 评定

MCM 评定测量不确定度基于概率分布传播的原理<sup>[5]</sup>。它通过对输入量的概率密度函数(PDF)离散抽样,由测量模型传播输入量的分布,计算获得输出量的 PDF 的离散抽样值,根据置信概率,进而由输出量的离散分布数值直接获取输出量的最佳估计值、标准不确定度和包含区间<sup>[15-22]</sup>。

MCM 适用于具有任意多个输入量和单一输出量的测量模型。依据 JJF 1059. 2-2012《用蒙特卡洛法评定测量不确定度》<sup>[23]</sup>,当测量模型明显呈非线性;或输入量的 PDF 明显非对称;或输出量的 PDF 明显非对称时,GUM 法将不再适用,此时可采用 MCM 进行评定。

应用 MCM 评定测量不确定度的实施步骤可概括为如图 4 所示。

1) 建立测量不确定度评定对应的测量模型式(1),确定模型各输入量。

2) 确定各输入量符合的概率分布及其密度函数。

对  $\delta_E$  按正态分布  $N(0, (0.559'')^2)$  考虑;通过测量重复性和复现性实验分析知  $\delta_{RT}$  服从正态分布  $N(0, (0.137'')^2)$ ,  $\delta_{RD}$  服从正态分布  $N(0, (0.191'')^2)$ 。

3) 根据各输入量的概率分布,通过计算机应用数学软件生成随机抽样数据模拟取值,取样本容量  $M = 10^6$ 。

4) 将以上  $M$  个输入量的值代入式(1)计算相应输出量的值,并将这  $M$  个输出量的值按严格递增排序,得到输出量的分布函数。

5) 根据置信概率  $P = 95\%$ ,由输出量的分布函数计算输出量的最佳估计值和标准不确定度。

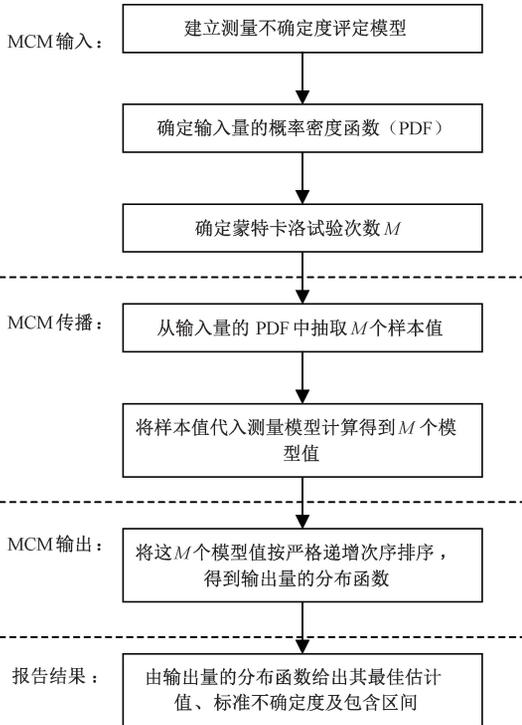


图 4 MCM 评定流程

Fig. 4 Assessment process of MCM

按上述评定步骤,基于 MCM 评定靶镜正交偏差角的测量不确定度,最终分别获得 3 个靶镜正交偏差角  $\theta_{xy}$ 、 $\theta_{zx}$  和  $\theta_{yz}$  的最佳估计值、标准不确定度和包含区间,如表 5 所示。

表 5 MCM 评定结果

Table 5 Evaluation results of MCM

偏差角	最佳估计值	标准不确定度	包含区间
$\theta_{xy}$	-3.359"	0.607"	[-4.551", -2.169"]
$\theta_{zx}$	+0.609"	0.565"	[-0.496", +1.717"]
$\theta_{yz}$	+0.480"	0.573"	[-0.644", +1.602"]

## 5 AMCM 评定

自适应蒙特卡洛法 (AMCM) 是在执行过程中,从基数试验次数开始,逐渐增加蒙特卡洛试验次数,直至所需要的各种结果达到统计意义上的稳定<sup>[24-25]</sup>。该方法有利于减小试验次数,降低试验成本。基于 AMCM 评定测量不确定度的步骤可概括为图 5 所示。

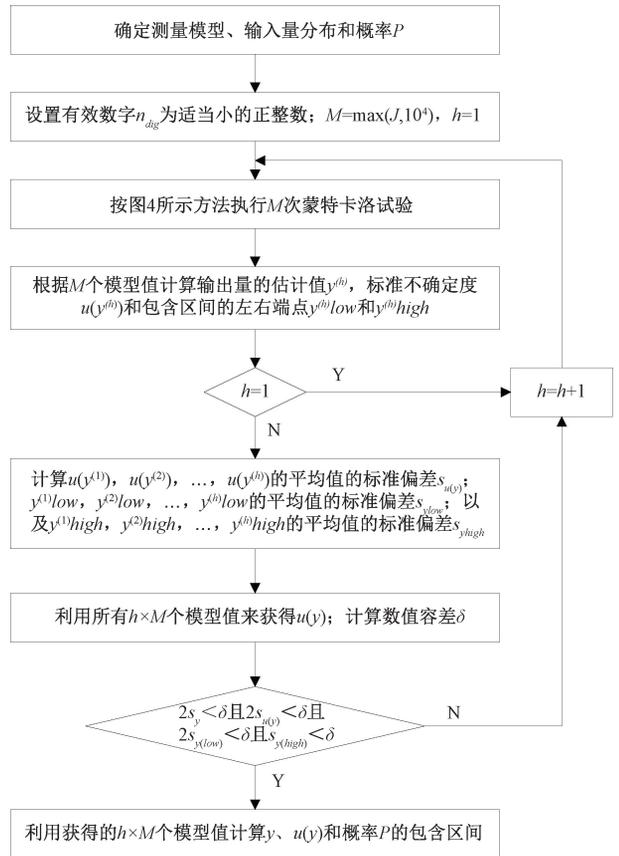


图 5 AMCM 评定流程

Fig. 5 Assessment process of AMCM

根据测量模型式(1)及输入量分布,应用自适应蒙特卡洛法的评定结果如表 6 所示。

表 6 AMCM 评定结果

Table 6 Evaluation results of AMCM

偏差角	自动抽样次数	最佳估计值	标准不确定度	包含区间
$\theta_{xy}$	$41 \times 10^4$	-3.360"	0.605"	[-4.546", -2.176"]
$\theta_{zx}$	$35 \times 10^4$	+0.609"	0.565"	[-0.498", +1.715"]
$\theta_{yz}$	$40 \times 10^4$	+0.480"	0.573"	[-0.645", +1.602"]

### 6 结 论

本文针对微纳米三坐标测量机中关键测量部件三维靶镜,充分利用现有实验资源,提出了利用 Nikon 6B 型自准直仪和 DP300 型精密回转工作台搭建实验系统测

量靶镜面间正交偏差角,并进行不确定度评定,从而检验靶镜加工精度是否满足要求的方法。为了保证测量评定的可靠性,文中分别采用 GUM 法、MCM 和 AMCM 这 3 种方法对靶镜面间正交偏差角测量结果进行不确定度评定,3 种评定方法得到的评定结果数据对比如表 7 所示,对应的评定结果输出量概率分布对比如图 6 所示。

表 7 3 种评定方法结果对比 (P=95%)

Table 7 Comparison of results of three evaluation methods (P=95%)

偏差角	评定方法	抽样次数	最佳估计值	标准不确定度	包含区间
$\theta_{xy}$	GUM	—	-3.360"	0.606"	[-4.548", -2.172"]
	MCM	10 <sup>6</sup>	-3.359"	0.607"	[-4.551", -2.169"]
	AMCM	41×10 <sup>4</sup>	-3.360"	0.605"	[-4.546", -2.176"]
$\theta_{xz}$	GUM	—	+0.610"	0.565"	[-0.497", +1.717"]
	MCM	10 <sup>6</sup>	+0.609"	0.565"	[-0.496", +1.717"]
	AMCM	35×10 <sup>4</sup>	+0.609"	0.565"	[-0.498", +1.715"]
$\theta_{yz}$	GUM	—	+0.480"	0.572"	[-0.641", +1.601"]
	MCM	10 <sup>6</sup>	+0.480"	0.573"	[-0.644", +1.602"]
	AMCM	40×10 <sup>4</sup>	+0.480"	0.573"	[-0.645", +1.602"]

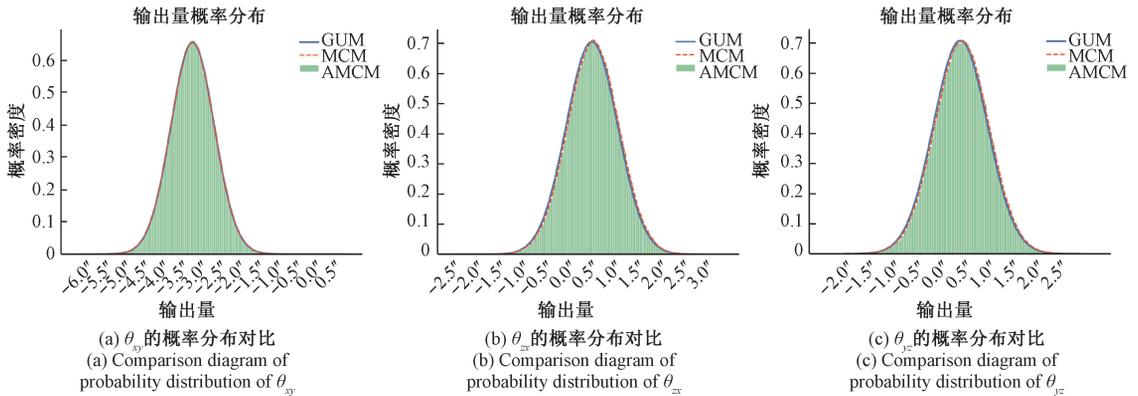


图 6 3 种方法评定结果对比

Fig. 6 Comparison chart of evaluation results of three methods

由表 7 可见,三维靶镜的 X-Y 面间正交偏差角在 3.3"左右,Z-X 面间正交偏差角和 Y-Z 面间正交偏差角在 0.5"左右。测量评定结果表明三维靶镜的正交性加工精度基本符合测量机精度设计要求,尤其 Z-X 面和 Y-Z 面间的正交性较好,加工精度较高。后续将基于第三方更高精度测量装置搭建实验系统对三维靶镜正交偏差角进行标定,深入研究正交偏差角引起的测量误差的修正方法,为提高微纳米坐标测量机测量精度提供经济有效的方法。

同时,由表 7 和图 6 可见,当输出量 PDF 符合正态分布或 t 分布时,GUM 法、MCM 和 AMCM 这 3 种方法所得评定结果基本一致;在 3 种评定方法中,MCM 和 AMCM 方法采取模拟抽样评定更符合实际的误差传播规律,得到的评定结果更为合理可靠,且 AMCM 较 MCM 减小了

蒙特卡洛试验次数,使测量评定更为经济高效。研究给出的测量评定方法不仅能够用于检验加工靶镜是否符合测量系统的精度要求,确定其是否可用作微纳米坐标测量机计量框架的重要部件;还可为微纳米坐标测量机面向任务的测量不确定度评定提供方法参考。

### 参考文献

[ 1 ] WIDDERSHOVEN I, DONKER R L, SPAAN H A M. Realization and calibration of the "Isara 400" ultra-precision CMM [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2011, 311(1): 012002.

[ 2 ] JÄGER G, MANSKE E, HAUSOTTE T, et al. Nanopositioning and nanomeasuring machine NPM-200—a new powerful tool for large-range micro- and nanotechnology[J]. Surface Topography: Metrology and

- Properties, 2016, 4(3): 034004.
- [ 3 ] RUIJL T. Ultra precision coordinate measuring machine-design, calibration and error compensation [ D ]. Delft University of Technology, The Netherlands, 2001, ISBN 90-6464-287-7.
- [ 4 ] 张珂, 张玮, 成果, 等. 支持向量机评定同轴度误差测量不确定度 [ J ]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(5): 29-36.  
ZHANG K, ZHANG W, CHENG G, et al. Evaluation of coaxiality error measurement uncertainty by support vector machine [ J ]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2020, 34(5): 29-36.
- [ 5 ] GB/T 27418-2017《测量不确定度评定和表示》[ S ].  
GB/T 27418-2017 Evaluation and Expression of Uncertainty in Measurement [ S ].
- [ 6 ] CNAS-CL01-G003 2021《测量不确定度的要求》[ S ].  
CNAS-CL01-G003 2021 Requirements for Measurement Uncertainty [ S ].
- [ 7 ] 路遥环, 裘祖荣, 尤悦, 等. 精密减速器角位移测量系统设计 [ J ]. 仪器仪表学报, 2021, 42(7): 14-20.  
LU Y H, QIU Z R, YOU Y, et al. Design of angular displacement measuring system for precision reducer [ J ]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(7): 14-20.
- [ 8 ] 费业泰. 误差理论与数据处理 [ M ]. 第 7 版. 北京: 机械工业出版社, 2015.  
FEI Y T. Error Theory and Data Processing [ M ]. 7th edition. Beijing: China Machine Press, 2015.
- [ 9 ] JJF 1059.1-2012《测量不确定度评定与表示》[ S ].  
JJF 1059.1-2012 Evaluation and Expression of Uncertainty in Measurement [ S ].
- [ 10 ] 李红莉. CMM 尺寸测量不确定度模型与评定方法 [ D ]. 合肥: 合肥工业大学, 2015.  
LI H L. Uncertainty model and evaluation method of CMM dimensional measurement [ D ]. Hefei: Hefei University of Technology, 2015.
- [ 11 ] 李红莉, 陈晓怀, 杨桥, 等. CMM 面向任务的多测量策略测量不确定度评定 [ J ]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29(12): 1772-1780.  
LI H L, CHEN X H, YANG Q, et al. Task-oriented measurement uncertainty evaluation of CMM under multi-strategies [ J ]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2015, 29(12): 1772-1780.
- [ 12 ] GB/T 18779.2-2004 产品几何量技术规范 (GPS) 工件与测量设备的测量检验 第 2 部分: 测量设备校准和产品检验中 GPS 测量的不确定度评定指南 [ S ].  
GB/T 18779.2-2004 Geometrical Product Specifications (GPS)--Inspection by measurement of work pieces and measuring equipment--Part 2: Guide to the estimation of uncertainty in GPS measurement, in calibration of measuring equipment and in product verification [ S ].
- [ 13 ] LI H L, CHEN X H, CHENG Y B, et al. Uncertainty modeling and evaluation of CMM task oriented measurement based on SVCMM [ J ]. Measurement Science Review, 2017, 17(5): 226-231.
- [ 14 ] 徐磊, 陈晓怀, 程银宝, 等. 坐标测量机孔径测量的不确定度评定模型研究 [ J ]. 中国测试, 2016, 42(1): 26-30.  
XU L, CHEN X H, CHENG Y B, et al. Uncertainty evaluation model for aperture measurement of coordinate measuring machines [ J ]. China Measurement & Test, 2016, 42(1): 26-30.
- [ 15 ] FANG CH Z, HUANG Q X, DING X M, et al. Measurement and uncertainty evaluation of the microsphere used for micro-CMM probe [ J ]. Measurement Science and Technology, 2020, 31(2): 025004.
- [ 16 ] 魏明明. 皮托管测量风速时 GUM 评定不确定度的偏差修正 [ J ]. 仪器仪表学报, 2019, 40(6): 146-154.  
WEI M M. Deviation correction of GUM evaluation uncertainty in the wind speed measurement by pitot tube [ J ]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(6): 146-154.
- [ 17 ] 闻春华. MCM 在两种关系模型测量不确定度评定中的应用 [ J ]. 国外电子测量技术, 2019, 38(11): 39-44.  
WEN CH H. Application of MCM in the evaluation of measurement uncertainty of two relationship models [ J ]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2019, 38(11): 39-44.
- [ 18 ] 魏明明. 蒙特卡洛法与 GUM 评定测量不确定度对比分析 [ J ]. 电子测量与仪器学报, 2018, 32(11): 17-25.  
WEI M M. Comparative analysis of measurement uncertainty between Monte Carlo method and GUM [ J ]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2018, 32(11): 17-25.
- [ 19 ] 徐磊, 陈晓怀. 蒙特卡洛法评定坐标测量机直径测量不确定度 [ J ]. 河南科技大学学报, 2016, 37(3): 15-24.  
XU L, CHEN X H. Evaluation of uncertainty in diameter measurement of coordinate measuring machine by Monte Carlo method [ J ]. Journal of Henan University of Science and Technology, 2016, 37(3): 15-24.
- [ 20 ] 李红莉, 陈晓怀, 王宏涛. 坐标测量机测量端面距离的不确定度评定 [ J ]. 中国机械工程, 2012, 23(20): 2401-2404.  
LI H L, CHEN X H, WANG H T. Uncertainty evaluation

- of CMM for end distance measurement [J]. China Mechanical Engineering, 2012, 23(20):2401-2404.
- [21] 刘存成, 胡畅. 基于 MATLAB 用蒙特卡洛法评定测量不确定度[M]. 北京: 中国质检出版社, 2014.  
LIU C CH, HU CH. Evaluation of Measurement Uncertainty by Monte Carlo Method based on MATLAB[M]. Beijing: China Quality Inspection Publishing House, 2014.
- [22] 陈怀艳, 曹芸, 韩洁. 基于蒙特卡洛法的测量不确定度评定[J]. 电子测量与仪器学报, 2011, 25(4): 301-308.  
CHEN H Y, CAO Y, HAN J. Evaluation of uncertainty in measurement based on Monte Carlo method[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2011, 25(4):301-308.
- [23] JJF 1059.2-2012 《用蒙特卡洛法评定测量不确定度》[S].  
JJF 1059.2-2012 Evaluation of measurement uncertainty by Monte Carlo method[S].
- [24] 张孝军, 程银宝, 吴军, 等. 自适应蒙特卡洛法评定量块校准测量不确定度[J]. 电子测量技术, 2020, 43(20):84-88.  
ZHANG X J, CHENG Y B, WU J, et al. Evaluation of measurement uncertainty of gauge block calibration by adaptive Monte Carlo method [J]. Electronic Measurement Technology, 2020, 43(20):84-88.
- [25] 方兴华, 宋明顺, 顾龙芳, 等. 基于自适应蒙特卡罗方法的测量不确定度评定[J]. 计量学报, 2016, 37(4): 452-456.  
FANG X H, SONG M SH, GU L F, et al. Application of adaptive Monte Carlo method on measurement uncertainty evaluation[J]. Acta Metrologica Sinica, 2016, 37(4): 452-456.

## 作者简介



**黄强先**, 1990 年于合肥工业大学获得学士学位, 1993 年于合肥工业大学获得硕士学位, 1998 年于合肥工业大学获得博士学位, 现为合肥工业大学教授、博士生导师, 主要研究方向为微纳三维测量技术、仪器精度理论等。

E-mail: huangqx@hfut.edu.cn

**Huang Qiangxian** received his B. Sc. degree from Hefei University of Technology in 1990, M. Sc. degree and Ph. D. degree from Hefei University of Technology in 1993 and 1998, respectively. Now he is a professor and doctoral supervisor in Hefei University of Technology. His main research interests include micro/nano three-dimensional measurement technology and instrument accuracy theory.



**张祖杨**, 2020 年于安徽大学获得学士学位, 现为合肥工业大学博士研究生, 主要研究方向为微纳测量技术及系统。

E-mail: zhangzuyang11@163.com

**Zhang Zuyang** received his B. Sc. degree from Anhui University in 2020. Now he is a Ph. D. candidate of Hefei University of Technology. His main research interests include micro/nano measurement technology and systems.



**郭小倩**, 2019 年于合肥工业大学获得学士学位, 现为合肥工业大学硕士研究生, 主要研究方向为微纳测量技术及系统。

E-mail: guoxq0617@163.com

**Guo Xiaoqian** received her B. Sc. degree from Hefei University of Technology in 2019. Now she is a M. Sc. candidate of Hefei University of Technology. Her main research interests include micro/nano measurement technology and systems.



**李红莉** (通信作者), 1998 年于合肥工业大学获得学士学位, 2005 年于合肥工业大学获得硕士学位, 2015 年于合肥工业大学获得博士学位, 现为合肥工业大学副教授、硕士生导师, 主要研究方向为现代精度理论及其应用、不确定度评定及应用。

E-mail: hlli@hfut.edu.cn

**Li Hongli** (Corresponding author) received her B. Sc. degree from Hefei University of Technology in 1998, M. Sc. degree from Hefei University of Technology in 2005 and Ph. D. degree from Hefei University of Technology in 2015, respectively. Now she is an associate professor and master supervisor in Hefei University of Technology. Her main research interests include modern accuracy theory and application, and uncertainty evaluation and application.