

文章编号: 1002-2082 (2020) 04-0810-06

基于组合标准器的显微 CT 系统测量方法研究

沙桐桐, 胡晓东, 赵金涛, 邹晶

(天津大学 精密仪器与光电子工程学院, 天津 300110)

摘要: 为保证显微 CT 系统测量精度, 采用标准器与样品共同测量的方式设计了可用于共同测量的组合标准器, 提出显微 CT 系统测量过程中修正比例误差与阈值误差的方法。在不改变显微 CT 系统扫描参数的情况下, 对航空航天常用的轻质材料聚四氟乙烯样品进行独立测量, 并与基于组合标准器的测量进行对比实验。结果表明, 基于组合标准器的显微 CT 系统测量方法较样品独立测量方法有效减小测量误差 $1 \mu\text{m} \sim 4 \mu\text{m}$, 鲁棒性好。

关键词: 显微 CT; 组合标准器; 三维重建; 测量精度

中图分类号: TN206; TH7

文献标志码: A

DOI: [10.5768/JAO202041.0409802](https://doi.org/10.5768/JAO202041.0409802)

Measurement method research for Micro-CT system based on combined calibrator

SHA Tongtong, HU Xiaodong, ZHAO Jintao, ZOU Jing

(School of Precision Instruments and Opto-Electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300110, China)

Abstract: In order to ensure the measurement accuracy of the Micro-Computed Tomography (Micro-CT) system, a combined measurement mode of the calibrator and the sample was adapted to design the combined calibrator which can be used for the combined measurement, and a method to correct the proportional error and the threshold error in the measurement process of the Micro-CT system was proposed. Without changing the scanning parameters of the Micro-CT system, the samples of polytetrafluoroethylene, a light material commonly used in aerospace, were measured independently and compared with the measurements based on the combined calibrator. The results show that compared with the sample independent measurement method, the proposed method can effectively reduce the measurement error of $1 \mu\text{m} \sim 4 \mu\text{m}$ and has better robustness.

Key words: Micro-CT; combined calibrator; 3D reconstruction; measurement accuracy

引言

显微 CT(micro computed tomography, Micro-CT)作为一种无损检测技术, 能够在不破坏样品的情况下, 对微型器件和各种生物材料进行 X 射线成像以分析其内部特征^[1]。在显微 CT 发展过程中, 逐渐修正了影响 X 射线成像的焦斑漂移、射束硬化等因素, 能够获得高质量重建图像。如 2016 年 Zhao 等人提出的转台误差修正方法, 显著提高了成像质量, 其成像分辨力可达 $1 \mu\text{m}$ 内^[2]。近年

来, 具有高分辨成像能力的显微 CT 逐渐被应用于测量领域, 实现了对样品外部尺寸与内部结构的可视化处理与测量^[3]。由于显微 CT 测量评价标准在国际上尚未达成共识, 测量结果的溯源体系尚未建立^[4], 并且存在一系列影响显微 CT 测量结果的因素, 如系统几何位姿导致的比例因子不准确、阈值分割导致的边缘偏移、环境导致的材料热膨胀等, 致使显微 CT 系统测量精度难以提高^[5]。针对显微 CT 测量样品方法的改进以提高其测量精

收稿日期: 2019-09-29; 修回日期: 2019-10-23

基金项目: 国家自然科学基金项目(61771328)

作者简介: 沙桐桐(1993-), 女, 硕士, 主要从事 X 射线成像系统精度标定方面的研究。E-mail: tong_ts@tju.edu.cn

导师简介: 胡晓东(1974-), 男, 博士, 教授, 主要从事扫描探针显微技术、微结构光学测试技术、X 射线显微成像技术以及微纳尺度测试仪器研发等方面的研究。E-mail: xdhu@tju.edu.cn

通信作者: 邹晶(1980-), 女, 博士, 副研究员, 主要从事 X 射线成像与图像处理方面的研究。E-mail: jingzoutd@tju.edu.cn

度, 目前主要有 3 种测量方法: 1) 样品独立测量。该方法受实验环境影响较大, 测量稳定性及可重复性较差^[6]。2) 先扫描标准器进行测量, 再扫描样品进行测量。该方法多次测量标准器与样品以减少测量误差, 但增加了测量时间与数据处理工作量^[7]。3) 对标准器与样品共同扫描进行测量。该方法减小了测量影响因素的作用, 提高了测量数据的可信度。2015 年, Hiller 等人对上述测量方法的比例因子都进行了修正, 方法对比明显, 但标准器相对单一, 需要耗费长时间对大量实验数据进行校验^[8]。2016 年, Stolfi 等人设计标准器与样品同时扫描进行测量, 虽然标准器评定体系完整, 但样品受阈值影响较大, 测量准确度难以保证^[9]。

因此, 本文利用标准器与样品共同测量的方法, 针对显微 CT 系统在轻质材料测量方面的比例误差与阈值误差进行修正, 设计了可与样品共同测量的组合标准器: CT 圆管和 CT 方管。CT 圆管在重建数据过程中对比例因子进行修正以获得体素尺寸; CT 方管则利用相同材质阈值设置相近的特点, 在重建过程中有效调整阈值, 减小由阈值选取引起的边缘偏移以获得准确体素数量。通过实验验证, 组合标准器与样品在显微 CT 系统内共同旋转扫描进行测量的方法, 可有效减小测量误差, 保证显微 CT 系统对测量精度的要求。

1 测量原理

显微 CT 系统几何位姿示意图如图 1 所示。

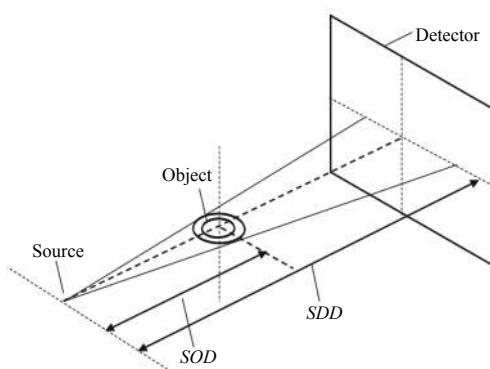


图 1 几何位姿示意图

Fig. 1 Schematic diagram of geometric pose

首先获取包含样品扫描信息的二维投影图像, 然后一系列二维投影图像经重建算法重构为三维图像, 三维图像由一个个体素构成^[10], 体素尺寸为

$$v = \frac{SOD}{SDD} p \quad (1)$$

式中: v 为体素尺寸; SOD (source object distance) 为射线源焦斑到旋转中心距离; SDD (source detector distance) 为射线源焦斑到探测器中心距离; p 为像素尺寸。

在已知体素尺寸的情况下, 通过确定被测长度所拥有的体素数量实现对某一材质长度的测量。确定测量长度为

$$l = nv \quad (2)$$

式中: l 为长度测量值; n 为体素个数; v 为体素尺寸。

2 标准器设计及标定

由(1)式可知, 体素尺寸与射线源焦斑到旋转中心距离 SOD 、射线源焦斑到探测器中心距离 SDD 存在直接关系。但显微 CT 系统安装精度有限, 测定 SOD 、 SDD 的准确性难以保证, 导致体素尺寸的准确性减小, 长度测量值存在误差。因此设计 CT 圆管与样品共同测量, 通过 CT 圆管的球距标定值与测量值关系修正体素尺寸, 再测量样品长度, 减少由体素尺寸引起的比例误差。

CT 圆管含有 6 个球, 有效距离为 15 个球距。如图 2 所示, 结构为 6 个红宝石球嵌入碳纤维圆管中, 碳纤维圆管外径 34 mm, 内径 32.4 mm, 高 40 mm, 壁厚 0.8 mm。红宝石球在管外壁横向以每 5 mm 为刻度分布, 纵向定位在 0°、90°、180° 和 270°。碳纤维对 X 射线吸收系数小, 红宝石球在 CT 高电压下具有良好的可检测性^[11]。同时, 球具有各向同性, 因此球心距可以准确确定体素数量。若球心距测量值存在偏差, 则只与体素尺寸有关, 因此设计 CT 圆管可以有效修正由体素尺寸引起的比例误差^[12]。

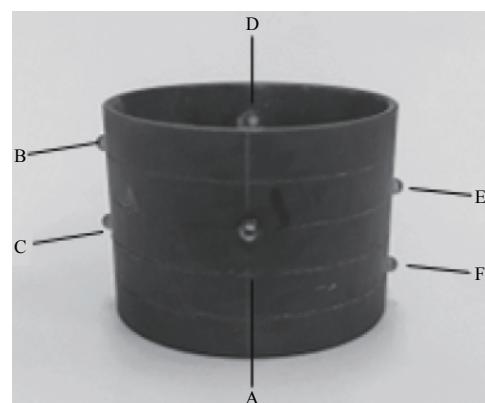


图 2 CT 圆管实物图

Fig. 2 Material object diagram of CT circular tube

由(2)式可知,确定体素数量对长度测量至关重要。在实际样品测量中,区分边缘以确定被测长度所含体素数量。阈值灰度值是区分边缘的依据,如果阈值选取不当引起边缘偏移,那么就难以准确确定体素数量^[13]。CT圆管球心距不存在因边缘限定不均而导致体素数量计算上的错误,不受阈值选取影响,即不存在阈值误差。一般情况下,显微CT所测样品结构复杂,尺寸精密,受阈值选取影响较大。对于同种材质或密度相近的材质而言,所选取的阈值相近,因此设计同材质的CT方管与样品共同扫描再测量,通过CT方管内外径测量值与标定值的关系选定图像阈值,减小阈值误差,以准确确定体素数量^[14]。

CT方管,如图3所示,设计为内圆外方的结构,外结构为10 mm×10 mm的方形,内结构为直径6.5 mm的圆形,高度为25 mm。根据NIST公布的X射线吸收系数及曲线,CT方管材质为航空航天常用的轻质材料聚四氟乙烯。CT方管的方形外径与圆形内径可针对样品的不同边缘结构处理,结构简单,可适用性强。

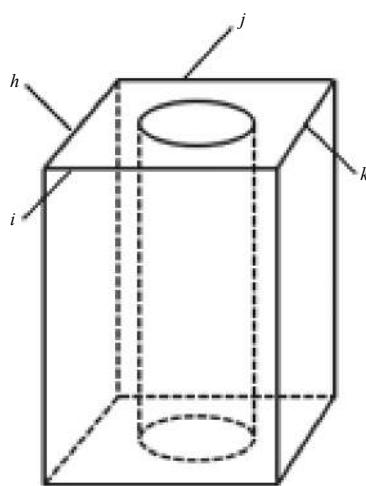


图3 CT方管示意图

Fig. 3 Schematic diagram of CT square tube

利用接触式三坐标测量机(coordinate measuring machine, CMM)对组合标准器CT圆管、方管进行标定。CMM的最大允许误差MPE=(0.4+L/900) μm(L单位为mm),组合标准器CT圆管、方管置于温度为(20±0.3) °C的工作环境中24 h后再标定处理。在对CT圆管进行标定时,需注意应分别使用顺时针和逆时针2种测量序列模式对图2中A、B、C、D、E、F等6个球进行标定,用最小二乘法对球的直径进行量化、拟合球心,然后计算各球体

之间的x、y和z距离标定球心的距离。在对CT方管进行标定时,对内径和4个外径逐一标定,组合标准器相关标定值如表1所示。

表1 组合标准器标定值

Table 1 Calibration values of combined calibrator

标准距	标定值/mm	标准距	标定值/mm
B-C	9.832	A-F	26.417
E-F	10.199	D-F	28.902
A-E	24.327	A-D	35.123
B-D	24.608	C-F	35.004
A-C	25.307	C-F	35.230
D-E	24.949	B-E	35.279
A-B	25.672	B-F	38.223
C-D	26.453	方管内径	6.413
方管外径 <i>h</i>	9.999	方管外径 <i>i</i>	9.998
方管外径 <i>j</i>	9.998	方管外径 <i>k</i>	9.999

3 修正方法

3.1 修正比例误差获得体素尺寸

将CT方管与样品置于CT圆管内部,共同在精密转台上扫描。基于扫描数据重建,重建完成后,采用数据分析与可视化软件VGStudio Max3.0进行表面测定、评估,对重建数据进行高斯滤波,利用最小二乘法拟合球测定提取基于CT圆管的15个球心距。

使用CT圆管对体素值不准确导致的比例误差进行修正,比例误差修正的量化为

$$S = \frac{1}{15} \sum_{i=1}^{15} \frac{L_i^{\text{CMM}}}{L_i^{\text{CT}}} \quad (3)$$

式中:S为比例因子修正值; L_i^{CMM} 为由CMM标定的球心距; L_i^{CT} 为由CT测量的球心距。

通过比例因子与已知体素尺寸的计算,获得体素修正尺寸为

$$v' = S v \quad (4)$$

式中: v' 为体素修正尺寸; S 为比例因子修正值; v 为已知体素尺寸。

3.2 修正阈值误差获取体素数量

在利用(4)式对比例误差修正完成获得体素修正尺寸后,重新将重建数据导入VGStudio Max3.0中对CT方管体素和背景体素进行阈值分割,分割结果需满足如下条件

$$L_R^{\text{CT}} = L_R^{\text{CMM}} \quad (5)$$

式中: L_R^{CT} 为 CT 方管通过比例误差修正后的 CT 测量值; L_R^{CMM} 为 CT 方管的标定长度值。

CT 方管所包含的内径与方形 4 个外径尺寸的 CT 测量值 L_R^{CT} 需与标定值 L_R^{CMM} (如表 1 所示) 相等, 调节灰度图手动调整阈值使 CT 方管内外径测量值 L_R^{CT} 满足(5)式, 应用此阈值确定样品边缘以获得被测长度所包含体素数量。

4 实验验证

本文方法所针对的样品为聚四氟乙烯材质阶梯块。如图 4 所示, 由于在 CT 图像重建中背景至材质、材质至背景的分割可能存在差异, 因此阶梯块的标定距离包括单向距离与双向距离。单向距离两边缘分别对背景至材质、材质至背景进行分割, 双向距离两边缘都针对背景至材质进行分割, 单向距离为编号 1~3, 双向距离为编号 4~6, 如表 2 所示。

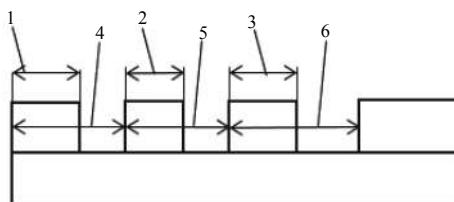


图 4 阶梯块示意图

Fig. 4 Schematic diagram of step block

表 2 阶梯块单向距离与双向距离标定值

Table 2 Calibration values of unidirectional distance and bidirectional distance of step block

单向距离编号	标定值/mm	双向距离编号	标定值/mm
1	3.256	4	5.321
2	1.771	5	3.825
3	3.296	6	5.715

在显微 CT 系统上进行 2 组扫描: 单独对阶梯块进行 5 次重复扫描, 将阶梯块与 CT 方管放置在 CT 圆管内进行 5 次重复扫描。2 组扫描设置相同, 扫描参数如表 3 所示。为了保证重建数据准确性, 阶梯块倾斜放置在样品台上扫描, 倾斜角度为 35°; 为了减小温度热效应的影响, 阶梯块、CT 方管、CT 圆管需在样品台上放置 0.5 h 后再进行扫描, 如图 5 所示。

在表 3 所示的扫描参数下进行扫描, 对扫描获得的投影数据在三维重建软件 Voxel Studio Recon

中重建。重建过程中对探测器参数校正, 并保证 2 组扫描的校正参数相同, 三维重建图像体素尺寸为 54 μm, 并将重建数据导入 VGStudio Max3.0 进行可视化处理, 如图 6 所示。

表 3 扫描参数

Table 3 Scanning parameters

参数	数据
扫描电压	80 kV
扫描电流	60 μA
SDD	107.153 mm
SOD	253.259 mm
探测器像素个数	1024×1024
探测器像素大小	127 μm×127 μm
数据体积	1024×1024×794
箱体内温度	(20.2±0.5) °C

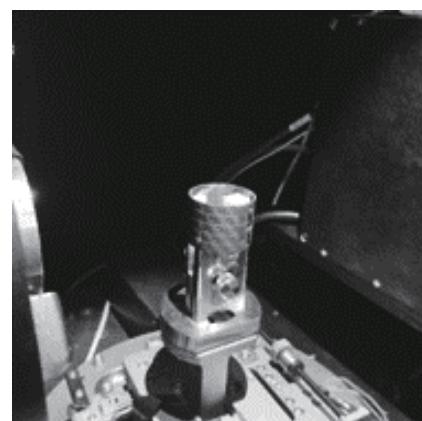


图 5 阶梯块与 CT 方管、CT 圆管扫描装置图

Fig. 5 Scanning device diagram of step block with CT square tube and CT circular tube

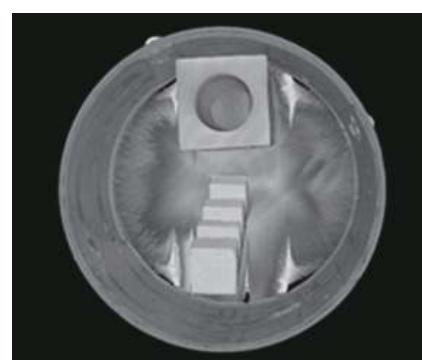


图 6 阶梯块与 CT 方管、CT 圆管三维重建图

Fig. 6 3D reconstruction diagram of step block with CT square tube and CT circular tube

对图 6 中 CT 圆管的 6 个球表面拟合并测量相应的 15 个球心距, 将测量值与表 1 中 CT 圆管标

定值代入(3)式得比例因子修正值 $S=0.999\,838$; 将 S 值代入(4)式得体素修正尺寸 $v=53.991\,252\,\mu\text{m}$ 。将体素修正尺寸替代已知体素尺寸重新导入重建数据, 在灰度图中调整阈值使 CT 方管的测量值 L_R^{CT} 满足(5)式。阈值设定并应用后, 重建图如图 7 所示。



图 7 CT 方管设定阈值重建图

Fig. 7 3D reconstruction diagram of CT square tube setting threshold

对基于组合标准器的测量阶梯块和独立测量阶梯块进行图像分析, 测量阶梯块有效距离编号 1~3 单向距离和编号 4~6 双向距离, 并根据显微 CT 几何量测量误差的不确定度来源^[15], 对阶梯块长度测量误差的测量不确定度评定, 评定模型为

$$U = k \sqrt{u_{\text{cert}} + u_{\text{res}} + u_{\text{rep}} + u_{\text{tem}}} \quad (6)$$

式中: 在置信水平为 95% 时, 包含因子 $k=2$; u_{cert} 为校准证书给出的测量误差不确定度分量; u_{res} 为仪器分辨力引入的标准不确定度分量; u_{rep} 为重复性引入的标准不确定度分量; u_{tem} 为温度引入的标准不确定度分量。

校准证书给出的测量误差为 $0.2\,\mu\text{m}$, 测量不确定度为 $0.2\,\mu\text{m}$, 包含因子 $k=2$; 仪器分辨力为 $0.01\,\mu\text{m}$, 区间半宽度为 $0.005\,\mu\text{m}$, 符合均匀分布, $k=\sqrt{3}$; 进行 5 次重复测量, 显微 CT 箱体实验温度处于 $(20.2\pm0.5)\text{ }^\circ\text{C}$ 范围, 温度变化量 $\Delta T=1\text{ }^\circ\text{C}$, 聚四氟乙烯材质的热膨胀系数约为 $10\times10^{-5}\text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ 。以表 2 中编号 1 单向距离为例, 根据上述分量条件评定扩展不确定度 $U=1.023\,3\,\mu\text{m}$ 。依次对编号 2~6 的测量不确定度评定, 阶梯块独立测量与基于组合标准器测量的误差对比如图 8 所示。其中, 独立测量阶梯块的误差为点划线所示, 基于组合标准器测量阶梯块的误差为实线所示。

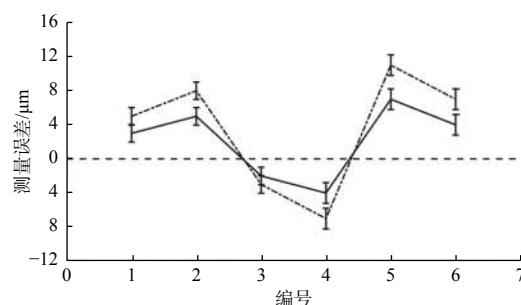


图 8 阶梯块独立测量与基于组合标准器测量的误差对比图

Fig. 8 Error comparison diagram of independent measurement of step block and measurement based on combined calibrator

可以看出, 在阶梯块单向距离与双向距离的测量上, 以本文方法对比独立测量, 测量误差明显减小, 显微 CT 系统测量精度显著提高。

将基于组合标准器的测量方法与现有的多次扫描标准器、样品的测量方法在测试流程所占用的时间和内存进行对比, 如表 4 所示。本文方法通过将显微 CT 系统校准、扫描、测量和重新校准的整个过程压缩到一个过程中, 减少了用时, 同时最小化数据存储要求, 优势明显。

表 4 基于组合标准器测量方法与现有多次扫描测量方法对比

Table 4 Comparison between measurement method based on combined calibrator and existing multi-scanning measurement method

现有多次扫描测量方法		基于组合标准器测量方法	
步骤	时间或内存	步骤	时间或内存
标准器扫描	1 h	组合标准器、样品扫描	1 h
样品扫描	1 h		
标准器再扫描	1 h		
数据分析测量	2 h	数据分析测量	1.4 h
总用时	5 h	总用时	2.4 h
数据体积	8.4 G	数据体积	2.8 G

5 结论

组合标准器 CT 圆管、方管的使用可以在重建数据评估时建立参考系统, 以修正比例误差与阈值误差, 从而获得准确的体素尺寸与体素数量, 保证显微 CT 系统的测量精度。本文方法与现有独立测量样品方法对比, 测量误差减少了 $1\,\mu\text{m}\sim4\,\mu\text{m}$; 与现有多次扫描测量方法对比, 本文方法将整个校准、扫描、测量、再校准过程压缩为一个过

程, 可以缩短约 50% 的时间, 减少了 CT 扫描 60% 的生成数据量。CT 圆管允许高灵活性的管径尺寸与不同空间分布的球体, CT 方管允许多样性的材质。因此不同尺寸、不同材质的样品可与 CT 方管在 CT 圆管内部区域中进行测量修正。本文对组合标准器 CT 圆管、方管的尺寸设计, 主要针对被测样品尺寸、组成结构范围, 也可以设计其他专用版本修正误差, 并将测量体积约束最小化。

参考文献:

- [1] KIEKENS K, WELKENHUYZEN F, TAN Y, et al. A test object with parallel grooves for calibration and accuracy assessment of industrial computed tomography(CT) metrology[J]. *Measurement Science and Technology*, 2011, 22(11): 115502.
- [2] ZHAO J T, HU X D, ZOU J, et al. Method for correction of rotation errors in micro-CT system[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2016, 816: 149-159.
- [3] JIMÉNEZ R, ONTIVEROS S, CARMIGNATO S, et al. Correction strategies for the use of a conventional micro-CT cone beam machine for metrology applications[J]. *Procedia CIRP*, 2012, 2: 34-37.
- [4] KRUTH J P, BARTSCHER M, CARMIGNATO S, et al. Computed tomography for dimensional metrology[J]. *CIRP Annals*, 2011, 60(2): 821-842.
- [5] BARTSCHER M, HILPERT U, GOEBBELS J, et al. Enhancement and proof of accuracy of industrial computed tomography(CT) measurements[J]. *CIRP Annals*, 2007, 56(1): 495-498.
- [6] HSEIH J. Computed tomography - principles, design, artifacts and recent advances[M]. [S.I.]: SPIE The International Society for Optical Engineering, 2003.
- [7] BARTSCHER M, SATO O, HÄRTIG F, et al. Current state of standardization in the field of dimensional computed tomography[J]. *Measurement Science and Technology*, 2014, 25(6): 064013.
- [8] MÜLLER P, HILLER J, DAI Y, et al. Quantitative analysis of scaling error compensation methods in dimensional X-ray computed tomography[J]. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 2015, 10: 68-76.
- [9] STOLFI A, DE CHIFFRE L. 3D artefact for concurrent scale calibration in computed tomography[J]. *CIRP Annals*, 2016, 65(1): 499-502.
- [10] CHEN Si, CHEN Hao, LI Jing, et al. An evaluation method for measurement accuracy of industrial CT[C]//Proceedings of the National Conference on New Technologies in Radiographic Digital Imaging and CT. Mianyang: Chinese Society for Stereology, 2012: 193-201.
- 陈思, 陈浩, 李敬, 等. 一种工业CT测量精度评估方法[C]//全国射线数字成像与CT新技术研讨会论文集. 绵阳: 中国体视学学会, 2012: 193-201.
- [11] CHEN Siwen. A method to calibrate micro-CT metrology system[D]. Tianjin: Tianjin University, 2016.
- 陈思文. 测量型显微CT系统的定值方法[D]. 天津: 天津大学, 2016.
- [12] ZHANG Jianlong, PAN Xin, HE Lei, et al. Error analysis of optical system for full-view and high-precision three-dimensional measuring instrument[J]. *Journal of Applied Optics*, 2018, 39(3): 392-399.
- 张建隆, 潘鑫, 贺磊, 等. 全视角高精度三维测量仪光学系统误差分析研究[J]. 应用光学, 2018, 39(3): 392-399.
- [13] CHRISTOPH R, NEUMANN H J. X-ray tomography in industrial metrology: precise, economical and universal[J]. Verlag Moderne Industrie, 2012, 19 (2): 213-217.
- [14] QIU Lei, QIAN Bin, FU Yanjun, et al. Three-dimensional shape measurement method based on sinusoidal and triangular fringe projection[J]. *Journal of Applied Optics*, 2018, 39(4): 522-527.
- 邱磊, 钱斌, 伏燕军, 等. 基于正弦和三角波条纹投影的三维测量方法[J]. 应用光学, 2018, 39(4): 522-527.
- [15] General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine. GB/T 34874.3-2017 Geometrical product specifications (GPS): X-ray three-dimensional size measuring machines—Part 3: Acceptance inspection and reverification tests[S]. Beijing: China Standard Press, 2017: 14-15.
- 国家质量监督检验检疫总局. GB/T 34874.3-2017 产品几何技术规范(GPS): X射线三维尺寸测量机——第3部分: 验收检测和复检检测[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017: 14-15.