

文章编号: 1004-924X(2016)03-0521-05

用于多传感器坐标测量机探测误差评价 的薄环规标准器

位恒政*, 王为农, 裴丽梅, 郑庆国
(中国计量科学研究院, 北京 100013)

摘要: 设计了一种薄环规标准器,用于配有光学影像测头和接触式测头的多传感器坐标测量机的探测误差评价。该标准器兼有环规和二维平面标准圆的特征,孔的有效部分厚度为0.1 mm,圆度为0.5 μm ,可以满足大多数坐标测量机的校准需求,避免了普通标准器如标准球、环规对影像测头测量成像的影响。该标准器同时适用于接触式测头测量,锥孔结构保证了标准器的稳定性,用于接触式测量时,不会引起变形。利用设计的薄环规标准器实现了配有光学影像测头和接触式测头组合测量系统的探测误差评价,结果表明该标准器有效解决了上述组合系统探测误差的校准问题。参照 ISO10360-9标准,给出了多传感器组合测量系统的探测误差、尺寸测量误差以及位置误差,并利用坐标变换方法修正了位置误差,优化了系统参数。

关键词: 多传感器坐标测量机; 影像传感器; 接触式传感器; 薄环规标准器; 测量不确定度

中图分类号: TH701; TH72 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20162403.0521

Thin ring gauge artifact for probing error evaluation of multi-sensor coordinate measuring machine

WEI Heng-zheng*, WANG Wei-nong, PEI Li-mei, ZHENG Qing-guo

(National Institute of Metrology, Beijing 100013, China)

* Corresponding author, E-mail: weihz@nim.ac.cn

Abstract: A thin ring gauge artifact is designed to evaluate the probing errors of a multi-sensor Coordinate Measuring Machine (CMM) equipped with an imaging probe and a touch probe. This artifact is defined with a sharp edged hole in a metal plate. It has the features of both 2D circle and 3D ring gauge, the effective height of the hole is only 0.1 mm and the roundness is 0.5 μm . It is suitable to measure the touch probe as well as imaging probe. As the height effect of the hole for the imaging probe is eliminated, the artifact also could be used in the touching measurement. Moreover, the designed cone structure ensures the stability of the artifact, so the deformation could not be happened when it is used in the touching measurement. The artifact is used in the evaluation of the probing errors of a combined probing system equipped with the imaging probe and the touch probe, and the results show that the artifact has implemented the calibration of the probing errors. Finally, according to ISO 10360-9, parameters including combined size error, form error and location error are calculated and the method based on coordinate transform is applied to correction of location errors and optimization of systematic parameters.

Key words: multi-sensor coordinate measurement machine; imaging probe; touch probe; thin ring gauge artifact; measurement uncertainty

收稿日期: 2015-09-02; 修订日期: 2015-11-02

基金项目: 中国计量科学研究院基本科研业务费专项资金资助项目(No. 24-YZC1401)

1 引言

随着航天工业、汽车工业、医疗器械等领域的飞速发展,大量产品使用了复杂零件,这些零件具有多尺度特征尺寸和测量难度大的特点,其精度直接影响产品的质量及使用寿命。任何单一传感器都不能完成此类零件的全部特征测量。在几何量计量领域,多传感器坐标测量技术融合了高精度的接触式和非接触式传感器,成为解决复杂物体测量的重要手段^[1-5]。

多传感器坐标测量通常以坐标测量机为框架,集成接触式传感器、影像传感器、激光扫描传感器、结构光条纹扫描系统等于一体,充分利用不同传感器的优点,实现精确而高效的数字化测量。与单一传感器测量系统相比,多传感器测量系统可以快速得到更全面、更准确的信息,具有冗余性、互补性的特点。

目前,商用多传感器坐标测量机通常配有光学影像测头和接触式测头,其应用非常广泛。接触式测头的精度评价方法已经解决,组合测量系统的精度评价成为一个关键问题^[6-10]。由于影像测头属于2D测头,采用非接触测量方式;接触式测头属于3D测头,采用接触测量方式;因此,需要找到一种两种传感器测量均能适用的标准器。标准球适合接触式测量,但光学成像质量不佳,影响测量结果;二维平面标准圆适合光学测量,但不能用于接触式测量;环规对以上两种方法均适用,但其厚度会对光学影像测量产生一定的影响。丹麦技术大学的Chiffre等人研制了一种光机两用的孔板标准器^[9],其中孔加工在一薄的不锈钢板上,然后将薄孔夹在两个厚的不锈钢板之间,这种孔适合接触和非接触两种方式测量,孔的圆度为0.001 5 mm。

本文设计了一种薄环规标准器,该标准器兼有环规和二维标准圆的特点,避免了环规厚度对光学测量的影响,同时也适合接触式测量。与文献[9]中的标准器相比,该标准器的圆度可以达到0.000 5 mm,锥孔结构使标准器稳定。参照标准ISO10360-9^[11],利用影像和接触式两种传感器分别测量该标准器,给出了组合传感器测量系统的探测误差、尺寸测量误差以及位置误差,并利用坐标变换方法修正了位置误差,从而改善了多传感器测量系统的精度。

2 标准器设计

标准器要具有光机两用的特性,同时满足接触式测量和非接触测量。本文设计得到的标准器如图1所示,其结构尺寸如图2所示。该标准器的主要特征是0.1 mm厚的薄孔,该结构可以避免对光学测量的影响;锥孔结构保证了标准器的稳定性,在使用接触式测量时,不会引起变形。该标准器采用超精密数控车床进行加工,圆孔的形状误差为0.000 5 mm,可满足大多数多传感器坐标测量机的应用。

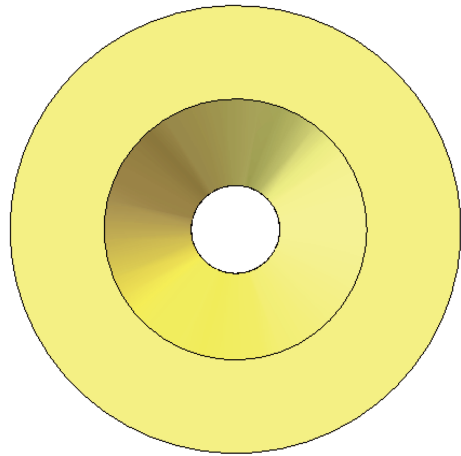
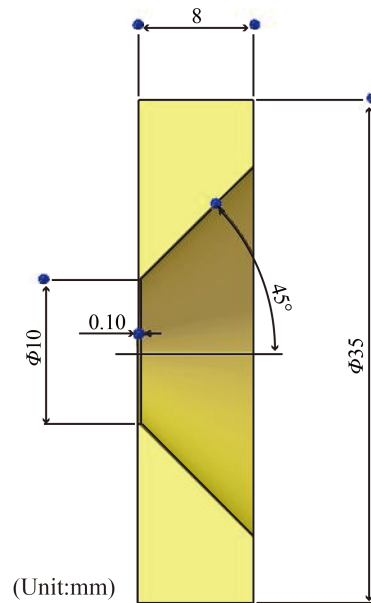


图 1 标准器示意图

Fig. 1 Schematic diagram of designed artifact



(Unit:mm)

图 2 标准器参数

Fig. 2 Parameters of designed artifact

3 测量方法及评价参数

多传感器坐标测量机中单个传感器的校准可参照ISO10360-5标准, 这里不再详述。本文主要研究多传感器组合系统的特性, 参照ISO10360-9标准, 具体方法如下: 在 XY 平面内的3个不同位置, 利用光学影像测头和接触式测头分别在圆孔标准器上均匀测量25个点, 每个位置重复测量3次, 并逐一拟合圆心坐标。对于2D和3D多传感器组合测量系统, 只需在 XY 平面上评价相关参数。评价参数有3个:

(1) 多传感器测量系统的位置误差 $L_{Dia.n \times 25} MPS$

用得到的所有圆心坐标拟合最小外接圆, 将外接圆的直径作为组合测量系统的位置误差。

(2) 多传感器测量系统的尺寸测量误差 $P_{Size.n \times 25} MPS$

利用所有测量点拟合圆, 将拟合圆的直径与名义值的差作为尺寸测量误差。

(3) 多传感器测量系统的形状测量误差 $P_{Form.n \times 25} MPS$

利用所有测量点拟合圆, 将所有点到圆心的最大值和最小值之差作为形状测量误差。

4 实验结果

利用一台具有影像测头、接触式测头、色散共焦测头、共焦显微测头的WERTH多传感器坐标测量机进行实验。该坐标机除了可以满足本实验研究之外, 还为开展多传感器坐标计量研究提供平台支持。实验室的温度长年保持在 $(20 \pm 0.2) ^\circ C$, 以保证实验结果的可靠性。

本实验主要利用多传感器坐标测量机的 $6.8 \times$ 影像测头和接触式测头分别测量薄环规标准器, 环规标准器的锥孔向下, 如图3所示。两种传感器的探测误差均为 0.0015 mm 。在计算分析测量数据时, 通过最小二乘法很容易计算多传感器测量系统的尺寸和形状测量误差, 而多传感器测量系统的位置误差则需要采用最小外接圆拟合^[12]。其基本思想是: 在所有点中任取3个点进行圆拟合, 如果该圆包含所有的点, 则该圆是外接圆。在所有满足条件的外接圆中, 选取直径最小的圆, 则为满足条件的最小外接圆, 如图4和图5所示。其中, “O”是影像测头测量得到的圆心坐标, “*”是接触式测头测量得到的圆心坐标。从图中可以看出, 单个传感器具有很好的测量重复性, 但两个传感

器相互之间的位置具有明显的偏移, 造成其位置误差偏大, 结果如表1所示。通过计算两组圆心坐标的偏移量进行平移变换, 重新计算评价参数。

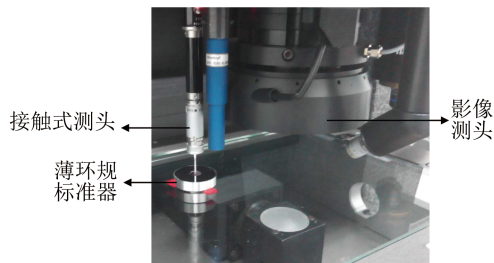


图3 薄环规标准器测量实验装置图

Fig. 3 Experiment setup for thin ring gauge artifact measurement

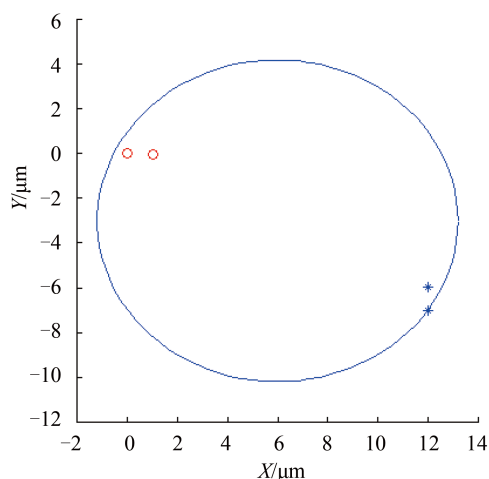


图4 圆心数据的最小外接圆示意图

Fig. 4 Minimum circumscribed circle for location error parameter

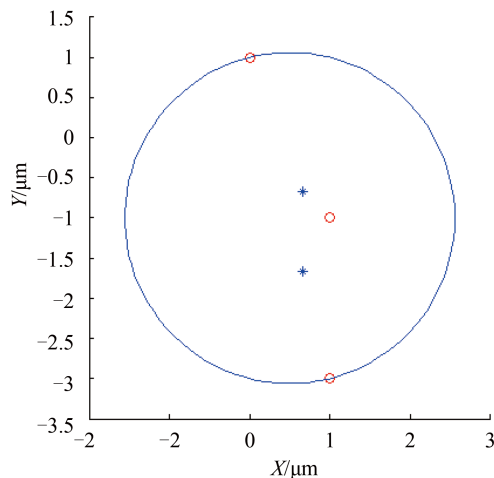


图5 平移后圆心数据最小外接圆示意图

Fig. 5 Minimum circumscribed circle for location error parameter after translation transform

表 1 多传感器测量系统的位置/尺寸/形状误差

Tab. 1 Location, size and form errors of multiple probing system

	$L_{\text{Dia.}n \times 25 \text{ MPS}}$	$P_{\text{Form.}n \times 25 \text{ MPS}}$	$P_{\text{Size.}n \times 25 \text{ MPS}}$
Location 1	0.001 0	0.002 2	0.000 9
Location 2	0.001 4	0.002 8	0.001 0
Location 3	0.002 6	0.003 7	0.000 9

(mm)

表 2 修正后多传感器测量系统的位置/尺寸/形状误差

Tab. 2 Location, size and form errors of multiple probing system after calibration

	$L_{\text{Dia.}n \times 25 \text{ MPS}}$	$P_{\text{Form.}n \times 25 \text{ MPS}}$	$P_{\text{Size.}n \times 25 \text{ MPS}}$
Location 1	0.000 4	0.002 1	0.000 9
Location 2	0.000 4	0.002 1	0.001 0
Location 3	0.000 5	0.002 1	0.000 9

(mm)

从表2可以看出, 测量结果得到了明显改善,

参考文献:

- [1] 张国雄. 坐标测量技术发展方向[J]. 红外与激光工程, 2008, 37: 1-5.
ZHANG G X. Development orientations of coordinate measuring techniques[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37: 1-5. (in Chinese)
- [2] WECKENMANN A, JIANG X, SOMMER K, et al.. Multisensor data fusion in dimensional metrology[J]. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 2009, 58: 701-721.
- [3] 李醒飞, 姚旺, 赵新华, 等. 多传感器测量系统的联合标定[J]. 光学精密工程, 2013, 21(11): 2877-2883.
LI X F, YAO W, ZHAO X H, et al.. Joint calibration of multi-sensor measurement system[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(11): 2877-2883. (in Chinese)
- [4] 刘书桂, 董英华, 姜珍珠. 光笔式视觉测量系统中的测头中心自标定[J]. 光学精密工程, 2013, 21(7): 1728-1733.
LIU SH G, DONG Y H, JIANG ZH ZH. Self-calibration of protip center for 3D vision coordinate measuring system in portable light pen[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(7): 1728-1733. (in Chinese)
- [5] HAMMAD M S, AL-AHMARI A. New developments in

这说明该标准器可用于系统参数的标定, 即确定两者之间的位置关系。

5 结论

本文利用设计的薄环规标准器实现了配有光学影像测头和接触式测头组合测量系统的探测误差评价。参照ISO10360-9标准, 给出了多传感器组合测量系统的探测误差、尺寸测量误差以及位置误差。该标准器的有效部分孔的厚度为0.1 mm, 圆度为0.000 5 mm; 锥孔结构保证了标准器的稳定性。实验结果表明: 该标准器具有光机两用的特性, 可同时满足接触式测头和影像测头的测量需求。因此, 该标准器可实现光学非接触测量与接触式测量结果的比较, 为光学测量结果的溯源提供了一条途径。不过, 两种传感器的位置误差偏大, 这是由于出厂时相互位置关系的标定不完善造成的。通过该标准器及坐标变换方法可减小位置误差。从此意义上说, 该标准器既可用于系统评价, 也可用于系统参数的标定。

- coordinate measuring machines for manufacturing industries[J]. *Int. J. Metrol. Qual. Eng.*, 2014, 5: 101-111.
- [6] TURLEY G A. Evaluation of a multi-sensor horizontal dual arm coordinate measuring machine for automotive dimensional inspection[J]. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2014, 72: 1665-1675.
- [7] JANICE R G, WILLIAM A C. Evaluating a hybrid 3-dimensional metrology system: merging data from optical and touch probe devices[J]. *SPIE*, 2011, 8133: 813301.
- [8] NEUSCHAEFER-RUBE U, EHRIG W, NEUGEBAUER M, et al.. Test procedures and artefacts for optical coordinate metrology[J]. *SPIE*, 2009, 7133: 713304.
- [9] CHIFFRE L D, HANSEN H N, MORACE R E. Comparison of coordinate measuring machines using an optomechanical hole plate[J]. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 2005, 54(1): 479-482.
- [10] CARMIGNATO S, VOLTAN A, SAVIO E. Metrological performance of optical coordinate measuring machines under industrial conditions[J]. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 2010, 59: 497-500.
- [11] ISO 10360-9. Geometrical product specifications(GPS) — Acceptance and reverification tests for coordinate measuring systems(CMS)-Part 9: CMMs with multiple

- probing systems[S]. International Organization for Standardization, 2014.
- [12] HSI-YUNG F, DAWIT H, M ABU T, *et al.*. An accurate

and efficient algorithm for determining minimum circumscribed circles and spheres from discrete data points[J]. *Computer-Aided Design*, 2013, 45(2): 105-112.

作者简介:



位恒政 (1978-), 山东人, 副研究员, 2004年、2008年于天津大学分别获得硕士、博士学位, 主要研究方向为坐标测量和螺纹测量技术。E-mail: weihz@nim.ac.cn



王为农 (1961-), 北京人, 副研究员, 1984年于清华大学获得学士学位, 主要研究方向为坐标和螺纹测量技术。E-mail: wangwn@nim.ac.cn

(本栏目编辑: 曹 金)