

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2209996

基于球盘的转台多自由度几何误差测量方法^{*}

杨 鹏^{1,2}, 林 虎², 杨 禹², 邹 伟², 季岚青^{2,3}

(1. 中国矿业大学(北京)机电与信息工程学院 北京 100083; 2. 中国计量科学研究院 北京 100029;
3. 中国计量大学计量测试工程学院 杭州 310018)

摘 要:转台作为数控机床及精密测量仪器的关键部件之一,可以将零部件移动至合适的位置,实现更高效的加工及测量任务,其自身的精度尤为重要。本文基于“three-rosette method”原理,提出一种基于球盘的转台多自由度几何误差优化测量方法,详细阐述了该方法的测量原理、转台几何误差的分离与解算方法。研制了圆形球盘,并在三坐标测量机的转台上开展了测量实验,实验结果表明采用12个标准球与优化后的6个标准球的测量结果基本一致,转台平移误差绝对差值不大于0.13 μm ,转角误差绝对差值不大于0.25"。最后,通过自准直仪装置测量该转台的分度误差,并与基于球盘的测量结果进行对比分析,结果表明上述不同方法得到的测量结果绝对差值不大于3.9",验证了基于球盘的转台多自由度几何误差测量方法的准确性。

关键词: 转台;几何误差;球盘;误差分离方法;多转位技术

中图分类号: TH72 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.40

Geometric errors measurement of rotary table based on a ball plate artifact

Yang Peng^{1,2}, Lin Hu², Yang Yu², Zou Wei², Ji Lanqing^{2,3}

(1. School of Mechanical Electronic & Information Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China; 2. National Institute of Metrology, China, Beijing 100029, China;
3. College of Metrology & Measurement Engineering, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: As one of the key components of CNC machine tools and precision measuring instruments, the rotary table can move parts to appropriate position to achieve efficient processing and measuring task. Its own accuracy is particularly important. Based on the principle of “three-rosette method”, an optimization measurement method for multi-DOF geometric errors of rotary table based on a ball plate artifact is proposed in this article. The measurement principle, separation and settlement method of geometric error of rotary table are described in detail. Experimental results show that the measurement results using 12 standard balls are consistent as those of 6 standard balls. The absolute difference of translation error of the table is not larger than 0.13 μm , and the absolute difference of rotation error is not greater than 0.25". Finally, an autocollimator is used to measure the indexing error of the rotary table, and the results are compared with those based on ball plate artifact. Results show that the absolute difference of the measurement results obtained by the above different method is not greater than 3.9", which evaluates the accuracy of the multi-DOF geometric errors measurement method based on ball plate artifact.

Keywords: rotary table; geometric errors; ball plate; error separation method; multiple orientation technique

0 引 言

转台作为数控机床及精密测量仪器的关键部件之一,在工业生产和制造过程中有着广泛的应用。通过计

算机系统控制,其可以快速旋转并实现准确定位,最终将零部件移动至合适的位置以实现更高效的加工或测量任务,因此,转台自身的精度就显得尤为重要。随着科学技术的不断发展,转台的性能和精度在设计 and 生产过程中已经得到了极大的改善。尽管如此,仍不可避免地存在

收稿日期:2022-06-21 Received Date: 2022-06-21

^{*} 基金项目:国家重点研发计划项目(2021YFF0600103)、国家重点研发计划项目(2017YFF0204804)、中国计量院基本科研业务费项目(AKYGH2003)资助

着由传动系统、轴承等因素引起的微小运动误差,而在需要高精度加工及测量的领域,这些微小误差都会对最终的测量结果产生极大干扰,因此,准确地测量并分离得到转台的各项几何误差有着很重要的实际应用价值。

转台作为单轴回转轴系,在笛卡尔坐标系下,其具有 6 个自由度的几何误差。在高精度制造及测量领域,通过对 6 项几何误差进行校正,可以显著提高零部件的制造质量及测量准确性,这主要体现在以下两个方面:1) 在加工过程中,可以根据校正后的转台对刀具路径进行调整,减小被加工件的形位误差;2) 在测量过程中,则可以实现对被测数据的补偿,以此来降低测量的不确定度,提高测量的准确性。

转台多自由度几何误差的测量方法大致可以分为直接测量及间接测量两种^[1]。直接测量方法简单,但所使用的测量仪器和标准器数量多,如可以利用自准直仪和多面棱体组合测量转台的分度误差、利用电感测微仪及标准球组合测量转台的径跳及轴跳误差,国外仪器厂商还研制了可以直接快速测量转台 5 项几何误差的双标准球检验心轴装置^[2-3]。因此,直接测量方法的成本较高,而且会消耗更多的人力物力。

间接测量方法通常只需要少量的测量仪器或标准器即可实现转台的测量,但是多自由度误差的分离与解算算法要相对复杂。如利用激光干涉仪^[4-5]、球杆仪^[6-8]、R-test^[9-10]以及激光跟踪仪^[11-13]来开展转台多自由度误差的测量。转台多自由度误差分离与解算算法中应用较多的是多转位技术^[14],如德国联邦物理技术研究院 (PTB) 提出了一种名为“three-rosette method”的误差分离方法^[15]。之后, Gunther 等^[16]在一个带有转台的三坐标测量机上使用“three-rosette method”对作为齿轮标准的圆形球盘进行了测试和验证。Wang 等^[17-18]研究了“three-rosette method”在龙门式三坐标测量机的大型转台上的应用。Kniel 等^[19]详细阐述了“three-rosette method”的误差分离方法并介绍了将其应用到转台上的测量方案和评估方法,通过该方法得到了转台的 6 项几何误差,验证了将该方法用于转台测量的可行性。

本文基于“three-rosette method”原理,提出了一种简化球盘和测量次数的优化方法,对该方法的测量原理和解算算法进行了阐述,并研制了一件标准球板开展转台几何误差的测量实验,得到转台的各项几何误差,最后使用自准直仪对转台的分度误差进行直接测量,从而验证本文误差分离方法的有效性。

1 转台多自由度误差测量及解算方法

1.1 多自由度误差定义

转台回转轴系在笛卡尔坐标系下有 6 个自由度的几何误差,分别是沿 X 、 Y 、 Z 三个轴方向移动的平移误差和

绕 X 、 Y 、 Z 三个轴旋转的转角误差。根据标准 VDI/VDE 2617 的定义,转台的多自由度几何误差可表示为:平移误差 ctx 、 cty 、 ctz ,转角误差 crx 、 cry 、 crz ,如图 1 所示。

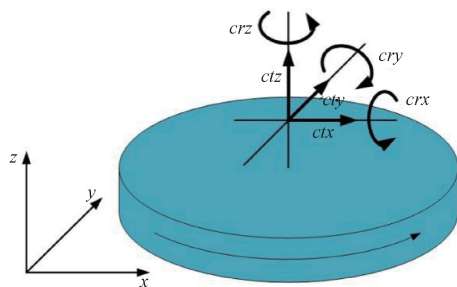


图 1 转台几何误差

Fig. 1 Geometric errors of rotary table

1.2 多自由度误差测量方法

1) “three-rosette method”测量方法

转台多自由度误差测量需要采用一个圆形球盘,上面装有 N ($N \geq 3$) 个标准球,标准球以圆形在球板上均匀分布,将球盘圆心尽可能固定在在转台中心处。

测量过程中,转台需要带动球盘旋转至多个角度位置,在每个角度位置处,需要知道每个标准球的球心在笛卡尔坐标系下的三维坐标。因此,需要采用机床的在机测头或者精密仪器的测头来测量每个标准球。

如图 2 所示,以球盘上 6 个标准球以及转台的 6 个角度位置为例介绍测量方法。图 2 中每一行表示转台的第 i ($i=1, 2, \dots, 6$) 个角度位置,球盘上编号为 1 的标准球的位置已被标注,且带叉号的小球表示测头此时的测量位置, e_{RTi} 表示转台在第 i 个角度位置处的误差值, e_M 表示机床或仪器在进行测量时系统误差的平均值, e_B 表示球盘上所有标准球位置偏差的平均值,在每一行所对应的转台第 i 个角度位置处的总误差为 $e_{RTi} + e_M + e_B$ 。另外,在转台的每个角度位置, e_M 和 e_B 都可以认为是相同的,并且可以通过减去平均值来消除。测量转台几何误差时,图 2 中的测量方法是沿对角线从右上到左下进行处理的,机床或仪器的测头每次旋转 60° ,转台则需要旋转 360° ,即在每一步中,测头移动到第 k ($k=1, 2, \dots, 6$) 个位置,之后在转台的旋转过程中对球盘上的每个标准球分别进行测量,在转台旋转 360° 后测头逆时针移动到第 $k+1$ 个位置,重复上述操作直至测头移动 6 次,最终得到 36 个标准球的球心坐标。

因此,球盘的标准球数量为 N 时,在整个测量周期内,机床或仪器的测头只旋转 360° ,而转台则旋转 $N \times 360^\circ$ 。通过多次测量得到转台第 i ($i=1, 2, \dots, N$) 个角度位置的第 j ($j=1, 2, \dots, N$) 个标准球的球心坐标 (x_{ij}, y_{ij}, z_{ij}) ,最终可以得到 N^2 个标准球的球心坐标,通

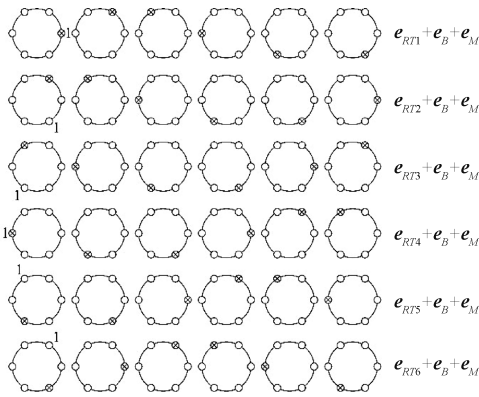


图2 测量方法

Fig. 2 Measurement method

过对 N^2 个球心坐标进行数据处理就可以分离并得到转台各角度位置的各项几何误差。

2) 优化测量方法

可以看到,通过“three-rosette method”方法获得转台各角度位置的几何误差时,在一个完整的测量周期内,其测量次数与圆形球盘上的标准球数量 N 有关,如果想获得转台更多角度位置的几何误差,则需要增加球盘上的球数,但这就需要耗费更多成本及时间。

因此,针对这一问题,提出了一种可以减少标准球数量及测量次数的优化方法,图3为优化测量方法图示,其与图2中的不同之处为只采用3个标准球对转台的6个角度位置开展测量,图中灰色小球表示优化后球盘上的3个标准球,带叉号的小球表示测头此时的测量位置。为满足“three-rosette method”原理分离得到转台在6个角度位置的各项几何误差,将图3中的6个测量位置分为两组,在第1组中,3个标准球均在转台的第1、3、5个角度位置进行测量,得到9个标准球的球心坐标;而在第2组中,3个标准球均在转台的第2、4、6个角度位置进行测量,同样得到9个标准球的球心坐标。因此,可以将两组分别看作以球盘上的3个标准球和转台的3个角度位置开展测量,其测量方法与图2的测量方法相同,但是测量次数仅为图2测量方法的1/2。

基于上述误差分离方法,可以分别对两组数据进行处理得到转台6个角度位置的几何误差。

1.3 多自由度误差解算方法

采用优化测量方法,球盘的标准球数量为 N 时,通过两组多次测量得到转台第 i ($i=1, 2, \dots, 2N$) 个角度位置的第 j ($j=1, 2, \dots, N$) 个标准球的球心坐标 (x_{ij}, y_{ij}, z_{ij}) ,最终可以得到 $2N^2$ 个标准球的球心坐标,通过对两组球心坐标分别进行数据处理可以分离并得到转台的各项几何误差。

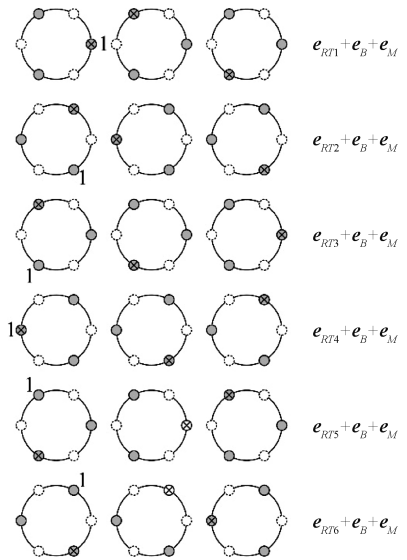


图3 优化后的测量方法

Fig. 3 Optimized measurement method

1) 转台对应第1组角度位置沿 X 、 Y 、 Z 轴方向的平移误差可以根据式(1)~(3)分别求得。

$$ctx_i = x_i - \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i \cos(2\pi(i-1)/N) + y_i \sin(2\pi(i-1)/N)) \right) \cdot \cos(2\pi(i-1)/N) + \quad (1)$$

$$\left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (-x_i \sin(2\pi(i-1)/N) + y_i \cos(2\pi(i-1)/N)) \right) \cdot \sin(2\pi(i-1)/N)$$

$$cty_i = y_i - \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i \cos(2\pi(i-1)/N) + y_i \sin(2\pi(i-1)/N)) \right) \cdot \sin(2\pi(i-1)/N) - \quad (2)$$

$$\left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (-x_i \sin(2\pi(i-1)/N) + y_i \cos(2\pi(i-1)/N)) \right) \cdot \cos(2\pi(i-1)/N) \quad (3)$$

$$ctz_i = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N z_{ij} - \frac{1}{N^2} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N z_{ij}$$

其中, x_i 和 y_i 分别为沿 X 轴和 Y 轴方向的总偏差,可以根据式(4)和(5)分别求得:

$$x_i = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N x_{ij} - \frac{1}{N^2} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N x_{ij} \quad (4)$$

$$y_i = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N y_{ij} - \frac{1}{N^2} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N y_{ij} \quad (5)$$

2) 转台对应第 1 组角度位置绕 X 、 Y 、 Z 轴方向的转角误差可以根据式(6)~(8)分别求得:

$$crx_i = rx_i - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N rx_i - \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (rx_i \cos(2\pi(i-1)/N) + ry_i \sin(2\pi(i-1)/N)) \right) \cdot \cos(2\pi(i-1)/N) + \quad (6)$$

$$\left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (-rx_i \sin(2\pi(i-1)/N) + ry_i \cos(2\pi(i-1)/N)) \right) \cdot \sin(2\pi(i-1)/N) - \quad (7)$$

$$cry_i = ry_i - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N ry_i - \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (rx_i \cos(2\pi(i-1)/N) + ry_i \sin(2\pi(i-1)/N)) \right) \cdot \sin(2\pi(i-1)/N) + \quad (8)$$

其中, rx_i 、 ry_i 和 rz_i 分别为绕 X 、 Y 和 Z 轴方向旋转的总角度,可以根据式(9)~(11)分别求得, R 为球盘上球心圆的平均半径,可以根据式(10)求得:

$$rx_i = \frac{2}{NR} \sum_{j=1}^N z_{ij} \sin(2\pi((i-1)/N + (j-1)/N)) \quad (9)$$

$$ry_i = -\frac{2}{NR} \sum_{j=1}^N z_{ij} \cos(2\pi((i-1)/N + (j-1)/N)) \quad (10)$$

$$rz_i = \frac{1}{NR} \sum_{j=1}^N (-x_{ij} \sin(2\pi((i-1)/N + (j-1)/N)) + y_{ij} \cos(2\pi((i-1)/N + (j-1)/N))) \quad (11)$$

$$R = \frac{1}{N^2} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N (x_{ij} \cos(2\pi((i-1)/N + (j-1)/N)) + y_{ij} \sin(2\pi((i-1)/N + (j-1)/N))) \quad (12)$$

上述各式中, i 为转台第 1 组各角度位置序号, $i=1, 2, \dots, N$ 转台第 2 组各角度位置的几何误差解算方法同理。

2 验证实验

2.1 实验球盘及装置

在本实验中,根据转台的实际尺寸(直径为 400 mm),设计了一个圆形球盘,如图 4 所示,底盘直径

与转台相同,12 个标准球以圆形均匀分布在底盘上,球心圆的直径为 370 mm,实验所用标准球的直径为 25.4 mm,形状误差小于 0.1 μm ,采用精度较高的标准球可以减小表面形状误差对实验结果的影响。

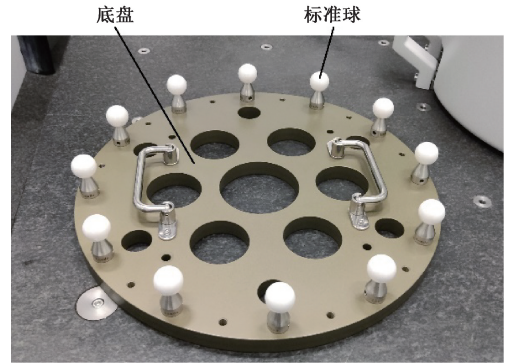


图 4 实验所用球盘

Fig. 4 The ball plate artifact for the experiment

底盘的材料为硬铝,硬铝有良好的机械性能,具有强度大、易于加工以及成本低的优点,而且由于其密度较小,在同等体积下重量轻,因此可以用作轻型结构材料。

除了上述圆形球盘外,采用一台带转台的三坐标测量机开展验证实验,整体的实验球盘及装置组成如图 5 所示。

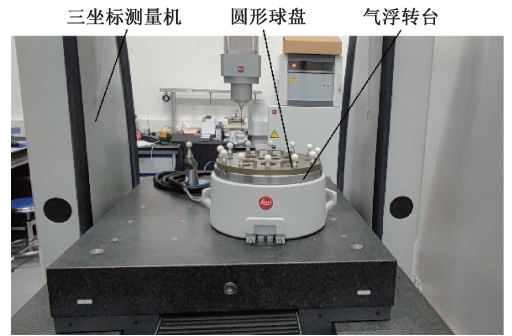


图 5 实验标准器及装置

Fig. 5 The standards and machine for experiment

2.2 实验方案

使用圆形球盘测量转台各项几何误差的实验过程可分为准备和测量两个阶段,如图 6 所示。

在测量阶段,转台顺时针旋转,三坐标测量机的测头逆时针旋转,并且球也是逆时针编号。其中,球心圆的直径为 370 mm,“three-rosette method 方法和优化后的方法所对应的标准球个数分别是 $N_1 = 12$ 、 $N_2 = 6$ 。

2.3 转台几何误差测量结果

根据多自由度误差解算公式,在 Mathematica 软件中编写程序,以球心坐标和转台的角度位置作为输入参数,将实验测得的球心实际坐标值输入到程序中求解转台的各项几何误差。采用不同数量的标准球分别进行了 3 次

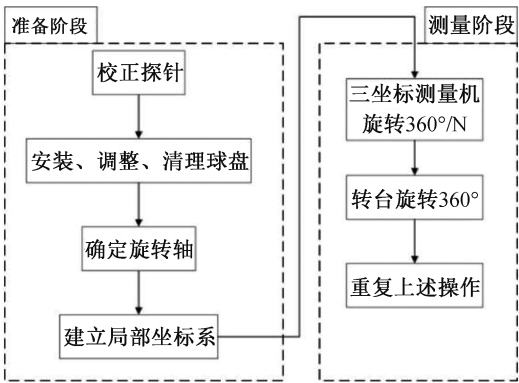


图 6 实验流程图
Fig. 6 Experiment flow chart

重复实验,在每次测量前需要重新确定旋转轴并建立相应的局部坐标系。

转台沿 X 、 Y 、 Z 三轴方向的平移误差 ctx 、 cty 、 ctz 的测量结果如图 7 所示。图 7 中两条曲线分别是 3 次重复测量结果的平均值。测量结果表明,采用不同球数分别测量得到的转台 3 项平移误差曲线趋势基本相同, ctx 和 cty 的绝对差值不大于 $0.13\text{ }\mu\text{m}$, ctz 的绝对差值不大于 $0.03\text{ }\mu\text{m}$ 。从测量结果也可以看到,该转台在 X 和 Y 轴上的平移误差较小,沿 Z 轴的平移误差相对大一些,且呈现规律性变化。

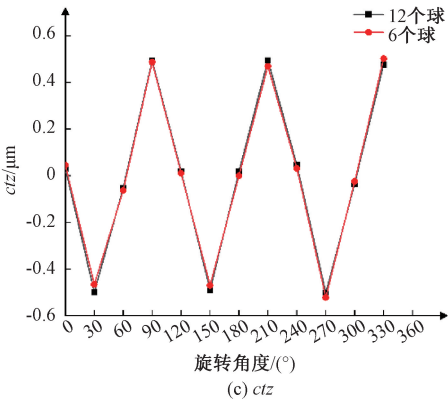
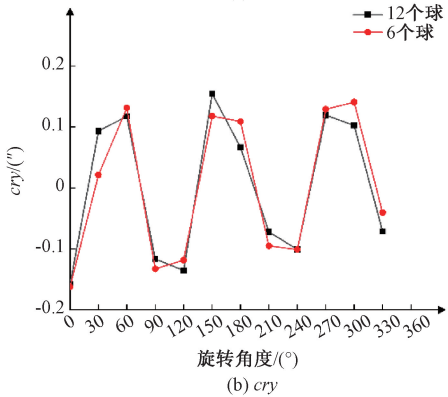
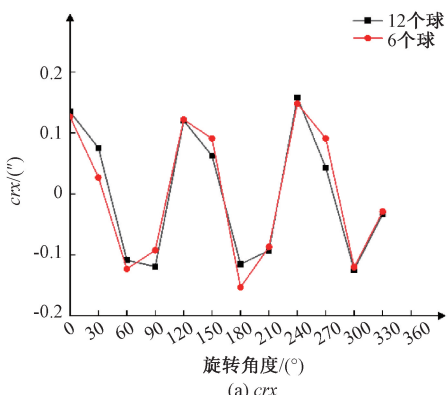
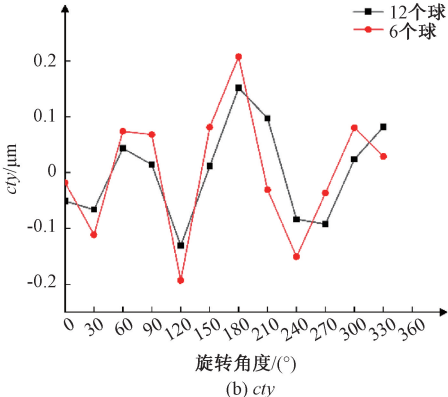
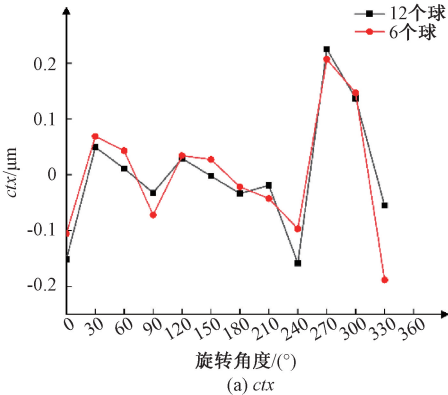


图 7 沿三轴方向的平移误差的测量结果
Fig. 7 The measurements of axial errors along three axes

转台绕 X 、 Y 、 Z 三轴旋转的转角误差 crx 、 cty 、 crz 的测量结果如图 8 所示。图 8 中的两条曲线同样是 3 次重复测量结果的平均值。测量结果表明,采用不同球数分别测量得到的转台 3 项转角误差曲线趋势基本相同, crx 的绝对差值不大于 $0.05''$, cry 的绝对差值不大于 $0.07''$, crz 的绝对差值不大于 $0.25''$ 。从测量结果也可以看到,该转台绕 X 和 Y 轴的角度误差较小,绕 Z 轴的角度误差较大。



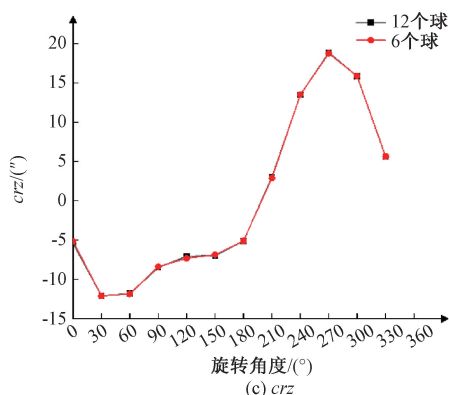


图 8 绕三根轴旋转的转角误差的测量结果

Fig. 8 The measurements of radial errors around three axes

2.4 自准直仪测量对比实验

为验证上述误差分离方法的准确性,采用自准直仪及多面棱体对转台绕 Z 轴的角度误差即分度误差 crz 进行测量对比实验。实验装置如图 9 所示。

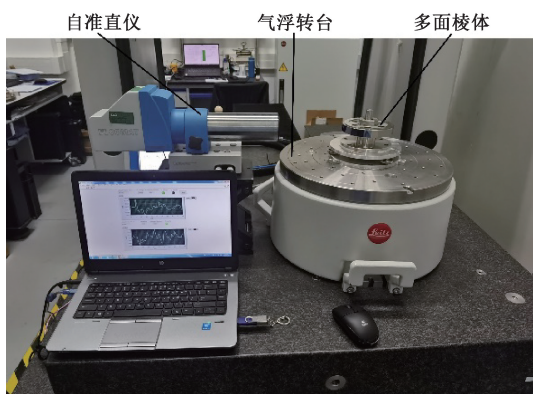


图 9 自准直仪对比实验装置

Fig. 9 The comparative experiment using an autocollimator

实验采用的是 24 面棱体,因此转台以 15° 为步长进行旋转测量。为了与球盘的测量结果对比,仅给出以 30° 为步长的测量数据,如图 10 所示,基于球盘的测量方法

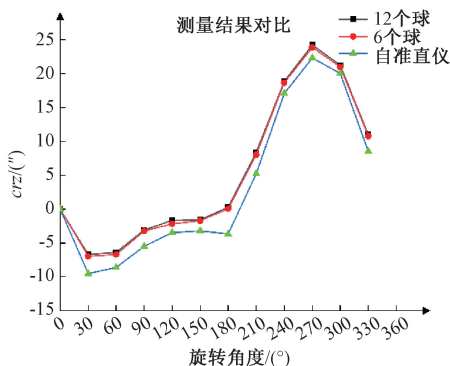


图 10 测量结果对比

Fig. 10 Comparison of measurement results

得到的转台分度误差 crz 与自准直仪测得的结果趋势是一致的,其中,采用 12 个标准球测量得到的结果与自准直仪测量得到的结果绝对差值最大为 $3.9''$,采用 6 个标准球测量得到的结果绝对差值最大为 $3.7''$,对比实验结果表明,基于球盘的转台几何误差测量方法是有效的。

3 结 论

相对“three-rosette method”方法,本文所提出的优化测量方法可以减少圆形球盘的标准球数量,并且减少测量次数,可以在更短的时间内,实现转台多自由度几何误差的测量。通过研制的圆形球盘在三坐标测量机的转台上开展了验证实验,实验结果表明,两种方法测得的转台平移误差和角度误差基本一致。在此基础上,通过自准直仪测量对比实验,有效验证了基于球盘的转台几何误差测量方法的准确性。最后,通过本文优化方法可以在不增加球板上标准球个数的基础上进一步获得转台更多角度位置的各项几何误差,可以极大的减少测量所需的时间,提高测量效率。

参考文献

- [1] SCHWENKE H, KNAPP W, HAITJEMA H, et al. Geometric error measurement and compensation of machines-An update [J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2008, 57(2): 660-675.
- [2] 朱峰, 苟卫东, 李积元. 实施 ISO230-7 回转轴线的几何精度检验方案研究[J]. 青海大学学报(自然科学版), 2016, 34(2): 20-25.
- [3] 吴石, 樊正东, 刘献礼, 等. 考虑热误差的双转台机床工艺误差谱预测方法[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(5): 66-78.
- [4] ANANDAN K P, TULSIAN A S, DONMEZ A, et al. A technique for measuring radial error motions of ultra-high-speed miniature spindles used for micromachining [J]. Precision Engineering, 2012, 36(1): 104-120.
- [5] HE Z, FU J, ZHANG L, et al. A new error measurement method to identify all six error parameters of a rotational axis of a machine tool [J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2015, 88: 1-8.
- [6] 李国龙, 陶小会, 徐凯, 等. 数控机床转台位置相关几

- 何误差的快速测量与辨识[J]. 吉林大学学报(工学版), 2021, 51(2): 458-467.
- LI G L, TAO X H, XU K, et al. Rapid measurement and identification of position dependent geometric errors of CNC machine tool rotary table[J]. Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition), 2021, 51(2): 458-467.
- [7] 夏长久, 王时龙, 徐凯, 等. 基于球杆仪单轴运动测量的旋转轴几何误差辨识[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(7): 19-28.
- XIA CH J, WANG SH L, XU K, et al. Geometric error identification of rotary axes based on uniaxial motion measurement of double ball bar[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(7): 19-28.
- [8] 徐凯, 李国龙, 李喆裕, 等. 基于参数化建模的旋转轴误差快速辨识方法[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(8): 21-29.
- XU K, LI G L, LI ZH Y, et al. Fast error identification method for rotary axis based on parametric modeling[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(8): 21-29.
- [9] JIANG L, PENG B, DING G, et al. Optimization method for systematically improving non-contact R test accuracy[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 107(3): 1697-1711.
- [10] 李亮亮, 杜正春. 一种新型五轴加工中心误差测量装置的模式分析[J]. 上海交通大学学报, 2013, 47(11): 1801-1806.
- LI L L, DU ZH CH. Model analysis of a novel error measurement device of five-axis manufacturing center[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2013, 47(11): 1801-1806.
- [11] SCHWENKE H, SCHMITT R, JATZKOWSKI P, et al. On-the-fly calibration of linear and rotary axes of machine tools and CMMs using a tracking interferometer[J]. CIRP Annals Manufacturing Technology, 2009, 58(1): 477-480.
- [12] 殷建, 李明. 基于激光跟踪仪的五轴机床旋转轴误差测量[J]. 中国激光, 2015, 42(4): 252-259.
- YIN J, LI M. Errors measurement for rotation axis of five-axis machine tool based on laser tracker[J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(4): 252-259.
- [13] 李海涛, 郭俊杰, 邓玉芬, 等. 数控机床几何精度的位姿测量原理[J]. 西安交通大学学报, 2016, 50(11): 62-68.
- LI H T, GUO J J, DENG Y F, et al. Pose measuring principle of geometric accuracy of numerical control machine tools[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2016, 50(11): 62-68.
- [14] OSAWA S, BUSCH K, FRANKE M, et al. Multiple orientation technique for the calibration of cylindrical workpieces on CMMs[J]. Precision Engineering, 2004, 29(1): 56-64.
- [15] KNIEL K, HÄRTIG F, OSAWA S, et al. Two highly accurate methods for pitch calibration[J]. Measurement Science and Technology, 2009, 20(11): 115110.
- [16] GUENTHER A, STÖBENER D, GOCH G. Self-calibration method for a ball plate artefact on a CMM[J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2016, 65(1): 503-506.
- [17] WANG Q, MILLER J, VON FREYBERG A, et al. Error mapping of rotary tables in 4-axis measuring devices using a ball plate artifact[J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2018, 67(1): 559-562.
- [18] WANG Q, MILLER J, GROOVER J, et al. Experimental verification of an error mapping technique for rotary tables/axes[C]. Proceedings of the 33rd ASPE Annual Meeting, 2018: 21-25.
- [19] KNIEL K, FRANKE M, HRTIG F, et al. Detecting 6 DoF geometrical errors of rotary tables[J]. Measurement, 2019, 153: 107366.

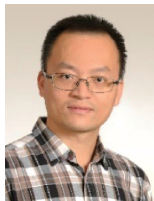
作者简介



杨鹏, 2019 年于中国矿业大学(北京)获得学士学位, 现为中国矿业大学(北京)硕士研究生, 主要研究方向为误差理论及数据处理。

E-mail: 745153082@qq.com

Yang Peng received his B.Sc. degree from China University of Mining and Technology (Beijing) in 2019. He is a currently pursuing his master degree at China University of Mining and Technology (Beijing). His main research interests include error theory and data processing.



林虎(通信作者), 2007 年于河海大学获得学士学位, 2010 年于北京工业大学获得硕士学位, 2013 年于北京工业大学获得博士学位, 现为中国计量科学研究院副研究员, 主要研究方向为齿轮计量、空间坐标测量。

E-mail: linhu@nim.ac.cn

Lin Hu (Corresponding author) received his B.Sc. degree from Hohai University in 2007, received his M.Sc. degree from Beijing University of Technology in 2010, and received his Ph.D. degree from Beijing University of Technology in 2013. He is currently an associate research fellow at National Institute of Metrology, China. His main research interests include gear metrology, space coordinate measurement.