

文章编号 1004-924X(2019)09-2053-09

圆光栅配合自准直仪测量主轴径向运动误差

娄志峰*, 郝秀朋, 刘力, 王晓东

(大连理工大学 机械工程学院, 辽宁 大连 116024)

摘要:提出一种在线非接触式测量主轴径向回转误差的方法,为验证其准确性,搭建了主轴回转误差测量装置并进行了比对实验。该方法主要由圆光栅、读数头、环形平面镜以及激光自准直仪组成。首先,将圆光栅及环形平面镜安装在主轴上,并在双顶尖装置中将光栅安装偏心误差和平面镜与主轴不垂直误差进行标定。然后,将主轴安装在转台上,双读数头对径安装,自准直仪安装在平面镜下方。在主轴回转过程中,双读数头圆光栅可以测得主轴径向运动误差,自准直仪可以测得主轴径向运动误差方向上的偏摆角误差。最后,根据主轴上一点的径向运动误差及其在此方向上的偏摆角误差便可以计算出主轴轴向各个点的径向回转误差。设计了比对实验,结果表明在主轴径向回转误差为 $\pm 12 \mu\text{m}$ 时,本方法与传统单向法比对残差在 $1 \mu\text{m}$ 以内。本文提出的主轴径向回转误差测量方法可以应用到精密主轴回转类装置中,实现在线检测主轴径向回转误差的目的。此外,该方法无需采用标准球,不受轴表面粗糙度、圆度等的影响。

关键词:圆光栅;双读数头;自准直仪;径向运动误差;误差分离

中图分类号:TG86;TH71 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20192709.2053

Spindle radial motion error measurement using a circular grating and a autocollimator

LOU Zhi-feng*, HAO Xiu-peng, LIU Li, WANG Xiao-dong

(College of Mechanical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

* Corresponding author, E-mail: louzf@dlut.edu.cn

Abstract: The purpose of this paper is to propose an online noncontact method for measuring the radial rotation error of the spindle and verify the accuracy of the method. This method used a circular grating, two reading heads, an annular plane mirror, and a laser autocollimator. First, the circular grating and annular plane mirror were mounted on the spindle, and the installation error was calibrated in the double center device. Then, the spindle was mounted on the turntable, the double reading head was mounted on the diameter, and the autocollimator was mounted under the flat mirror. During the spindle rotation process, the double reading head could measure the radial motion error of the spindle, and the autocollimator could measure the yaw angle error in the direction of the radial motion error of the spindle. Finally, the radial rotation error of each point of the spindle axis could be calculated according to the radial motion error of one point on the spindle and its yaw angle error in this direction.

收稿日期:2019-03-11;修订日期:2019-05-04.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. U1508211, No. 51621064),国家重点研发计划资助项目(No. 2017YFF0204800)

The results show that within $\pm 12 \mu\text{m}$ spindle radial rotation error measurement range. The residual error of the proposed method compared with the conventional method is within $1 \mu\text{m}$, which verifies the accuracy of the method. The proposed spindle radial rotation error measurement method does not need to use standard balls. It is not affected by the surface roughness, roundness, etc., of the spindle. The measuring device can be embedded into the precision spindle rotary-type device to realize the real-time detection of the spindle radial rotation error.

Key words: circular grating; dual reading-head, auto-collimator; radial motion error; error separation

1 引言

随着智能制造的发展,对数控机床的性能提出了更高的要求。主轴回转误差是影响数控机床性能的重要指标,也是衡量机床加工精度的重要因素^[1-2],对加工零件的几何形状误差、表面质量和粗糙度有着重要影响^[3-4]。主轴回转误差的精密测量与补偿技术是提高机床性能的重要手段^[5]。

主轴径向回转误差测量主要有打表法、单点法(单向法)、多点法等^[6-7]。目前,国内外较普遍的是使用电容或电感涡流传感器对安装在主轴上的标准球进行单点或多点测量^[8]。上述方法不可避免地会引入标准球的形状以及安装偏心等误差。在进行高精度主轴回转误差测量中,引入的这些误差不可忽略^[9]。因此必须采用误差分离技术将主轴回转误差分离出来。

为此,毛剑锋等人在自带偏心调整机构的测量装置上,结合玻璃半球与钢盘设计了新的标准器,采用轴向布置传感器的方法对其进行测量,建立数学模型实现主轴回转误差与标准器形状误差的分离^[1]。该方法达到了 $0.1 \mu\text{m}$ 的测量精度,但在实际使用中钢盘受环境影响较大,需要定期对钢盘进行标定。黄春霞在晶元对心转台径向误差测量中,采用集合平均法求出参考心轴固定误差并建立数据库,通过引用数据库,实现了参考心轴安装误差与转台径向回转误差分离的目的,达到了微米级测量精度^[10]。Ping Ma 在对机床回转误差分析中,将在线精加工工件作为径向运动误差参考轴,消除了参考轴的安装偏心引入的误差^[2]。叶建华等人基于标准球和机床在机测量系统提出一种旋转轴综合误差测量方法;引入模糊减法聚类和模糊 C 均值聚类方法建立旋转轴综

合误差的 RBF 神经网络模型;同时对 RBF 神经网络进行解析,获得误差模型的解析表达式,测量精度在 $10 \mu\text{m}$ 左右^[11]。Velenosi Alessandro 等人开发了一种运动分析模型,该模型能够将工件几何误差与机床的轴运动误差相关联,通过分析工件的精度反推机床主轴运动误差^[12]。Cappa 等人开发了多探头技术的改进装置,通过将传感器安装在高精度分度台上,实现了一个传感器在 3 个不同方向下测量主轴的运动误差^[13],避免了不同传感器引入的灵敏度误差,同时达到误差分离目的。雷大江等人通过将标准球和传感器同时旋转 180° 来获得起始位值和对径位置两组测量数据,从而解算出精密回转轴轴系的径向回转误差和标准球的圆度误差^[14]。

上述文章中主轴回转误差测量均需要借助标准球,受到标准球制造、安装精度影响较大,且上述方法多为离线测量,而在实际应用中主轴回转误差会随着负载变化而实时变化。

本文提出采用双读数头圆光栅测量主轴上一点的径向运动误差,同时采用自准直仪测量主轴偏摆误差,摆脱了标准球对测量的影响,可以实现轴向任意位置处径向回转误差的测量,实时检测主轴运动姿态。文中详细介绍了本方法的测量原理,并设计了与使用单向法测量主轴径向回转误差的比对实验,验证了本方法的准确性。

2 主轴回转误差测量方法分析

在回转工作台,电机带动固定在轴承上的主轴转动,由于制造与装配原因,导致主轴在回转过程中存在运动误差^[15-16]。另外,由于在加工或者测量状态下,主轴会受到外力的作用,也会引起其在转动过程中运动姿态发生变化^[16]。若能准确测量出来,即可建立误差分析模型,对

主轴运动误差引起的其它加工或测量误差进行有效补偿。

2.1 测量方法

一般主轴类回转装置由圆光栅测量主轴的回转角度。为了提高转角测量精度,很多高精度主轴回转装置采用具有对径安装双读数头的圆光栅测量转动角度^[17],通过分析双读数头采集的转动角度数据,消除圆光栅安装偏心及主轴径向跳动对回转角度测量的影响^[17-18]。同理,若已知圆光栅相对于主轴的安装偏心,也可采用双读数头测量主轴的径向运动误差。已知主轴上一点的径向运动,若再已知主轴的偏摆角度,即可知道主轴的运动姿态。

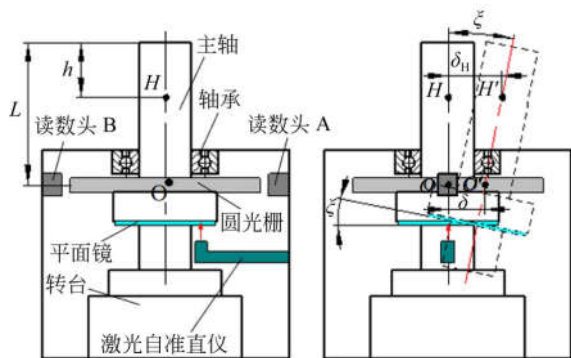


图 1 测量原理图

Fig. 1 Measuring schematic

为了测量主轴偏摆角度,可以采用激光自准直仪。如图 1 所示,在轴肩粘贴一平面镜,平面镜对应位置放置激光自准直测量系统,通过测量平面镜的角度变化来测量主轴的偏摆角。

在本文中,双读数头的圆光栅可以测得主轴在转动过程中光栅截面处的径向运动误差,自准直仪可以测得主轴在转动过程中其径向运动误差方向上的偏摆角误差,进而可知主轴的整体运动姿态。对于现有自带双读数头圆光栅的工作台,只需增加少量成本添加自准直仪,便可以实现主轴回转误差的在线测量。

2.2 主轴径向运动误差测量原理

采用双读数头圆光栅测量主轴转角的同时,可以测量光栅的径向回转误差,该误差由光栅安装偏心与主轴径向运动误差组成。

双读数头圆光栅测量径向回转误差的原理如图 2 所示(彩图见期刊电子版),图中蓝色部分为

圆光栅在初始时的位置,虚线部分为主轴存在径向回转误差,转过 θ 角度后圆光栅的位置。

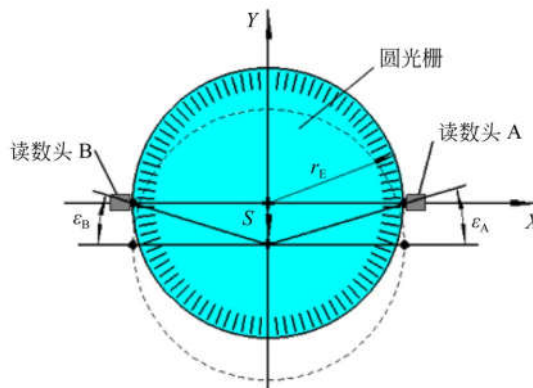


图 2 径向运动测量原理图

Fig. 2 Radial motion measurement schematic

圆光栅的两个读数头 A, B 对径放置,以读数头 A, B 连线为 X 轴,以初始位置时光栅的中心为原点,建立如图 2 所示的直角坐标系。图中圆光栅的半径为 r_E 。

当圆光栅顺时针转过 θ 角度后,在 Y 方向上有 $S(\theta)$ 的径向运动量,光栅移动至图中虚线位置。在 $S(\theta)$ 的影响下,读数头 A, B 分别有 $\epsilon_A(\theta)$ 和 $\epsilon_B(\theta)$ 的读数误差,由图中几何关系可知,此时读数头 A 的读数为:

$$\theta_A = \theta + \epsilon_A(\theta) = \theta + \tan^{-1}[S(\theta)/r_E]. \quad (1)$$

读数头 B 的读数为:

$$\theta_B = \theta + \epsilon_B(\theta) = \theta - \tan^{-1}[S(\theta)/r_E]. \quad (2)$$

由公式(1)和公式(2)可推出此时圆光栅中心处的径向运动量 $S(\theta)$ 为:

$$S(\theta) = \tan\left[\frac{\theta_A - \theta_B}{2}\right] \times r_E. \quad (3)$$

根据图 1 所示测量原理,测得的圆光栅径向运动量 $S(\theta)$ 由两部分组成:

$$S(\theta) = \delta(\theta) + E_Y(\theta), \quad (4)$$

式中: $\delta(\theta)$ 为主轴在 θ 角处的径向运动误差, $E_Y(\theta)$ 为主轴在 θ 角处光栅安装偏心 E 在 Y 方向的分量。其中 $\delta(\theta)$ 为待测量,需要将光栅安装偏心测量并分离出来,可采用图 3 所示方法。

圆光栅安装在主轴后,采用双顶尖固定主轴,转动主轴一周,双读数头同时读取圆光栅转动角度。由于此时主轴径向运动误差为零,因此根据式(3)计算出的光栅径向运动量即为光栅安装偏

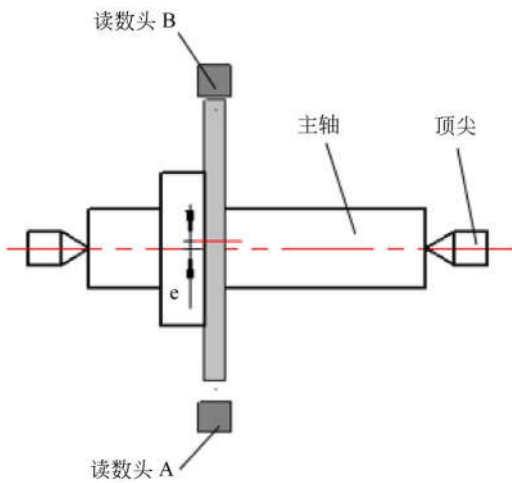


图 3 圆光栅安装偏心测量

Fig. 3 Grating installation eccentricity measurement

心 E 在各回转角度处 Y 向的分量, 即:

$$E_Y(\theta) = S_D(\theta), \quad (5)$$

式中 $S_D(\theta)$ 为在顶尖上测得的光栅径向运动量。

故图 1 中, 双读数头测得的主轴在 θ 角处的径向运动误差 $\delta(\theta)$ 为:

$$S(\theta) = S(\theta) - S_D(\theta). \quad (6)$$

2.3 主轴偏摆角测量原理

主轴转动的偏摆角度可采用自准直仪进行测量, 为了简化实验装置, 自行研制了小型激光自准直仪, 原理如图 4 所示。

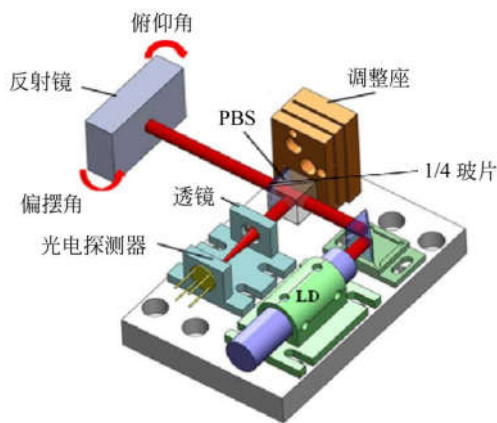


图 4 激光自准直仪光路原理图

Fig. 4 Laser auto collimator schematic

激光器发出的光线经过偏振分光镜和 1/4 玻片后投射到平面镜上, 由平面镜反射的光线再次经过 1/4 玻片进入偏振分光镜, 由于光线两次经过 1/4 玻片, 原来透射的光线将会发生反射, 反射

光线经透镜聚焦后投射到光电探测器上; 当平面镜有微小角度变化时, 反射光线将会与原光线产生微小角度再次汇聚到光电探测器上, 此时光斑在光电探测器上的位置将会发生变化而引起输出电压的变化, 通过预先标定激光自准直仪电压变化与角度变化之间的关系, 即可获取平面镜的角度变化值。

采用奥特梅尔公司 1000UH-3050 型光电自准直仪 (分辨率: $0.01''$; 精度: $\pm 0.1''$; 重复性: $0.03''$) 对自制激光自准直仪进行标定。标定结果如图 5 所示, 在 $\pm 100''$ 标定范围内, 标定残差在 $\pm 0.8''$ 以内, 满足测量精度要求。

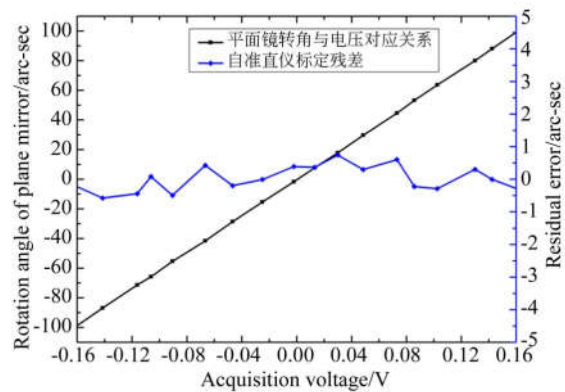


图 5 激光自准直仪标定

Fig. 5 Laser auto collimator calibration

根据图 1 所示测量原理, 自准直仪测得的角度变化 T 由 3 部分组成, 如式(7)表示:

$$T(\theta) = \xi(\theta) + \alpha(\theta) + \beta(\theta), \quad (7)$$

式中: $\xi(\theta)$ 为主轴的偏摆角, $\alpha(\theta)$ 为平面镜与轴线的不垂直引入的角度误差, $\beta(\theta)$ 为平面镜表面误差引入的角度误差。其中 $\xi(\theta)$ 为待测量, $\alpha(\theta)$ 和 $\beta(\theta)$ 属于系统误差, 需要进行分离, 可采用如图 6 所示方法。

将安装好平面镜的主轴固定在双顶尖上, 自准直仪固定于侧面, 转动主轴一周。由于此时主轴无偏摆, 因此自准直仪测得的角度变化 $T(\theta)$ 即为 $\alpha(\theta)$ 与 $\beta(\theta)$ 之和, 即:

$$\alpha(\theta) + \beta(\theta) = T_D(\theta), \quad (8)$$

式中 $T_D(\theta)$ 为在顶尖上自准直仪测得的角度变化。

进而可以分离出图 1 中主轴的偏摆角 $\xi(\theta)$:

$$\xi(\theta) = T(\theta) - T_D(\theta). \quad (9)$$

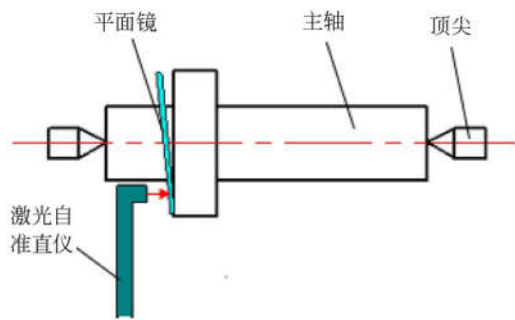


图 6 平面镜相对于主轴偏摆误差测量
Fig. 6 Measurement of yaw error of mirror

2.4 主轴姿态表达公式

已知主轴在光栅处径向跳动 δ 与主轴偏摆角 ξ , 即可根据公式(10)求得主轴上任意一点 H 处的径向回转误差 δ_{H1} 。

$$\delta_{H1}(\theta) = \delta(\theta) + (L - h) \times \tan \xi(\theta), \quad (10)$$

式中: L 为光栅中心距轴端的距离; h 为点 H 距轴端的距离(见图 1)。

3 测量实验与数据分析

为验证本方法的可行性, 搭建了如图 7 所示的比对实验装置。采用对径双读数头的圆光栅测量转动角度及主轴的径向跳动。自准直仪固定在平面镜下方, 用来测量主轴转动过程中的偏摆角。

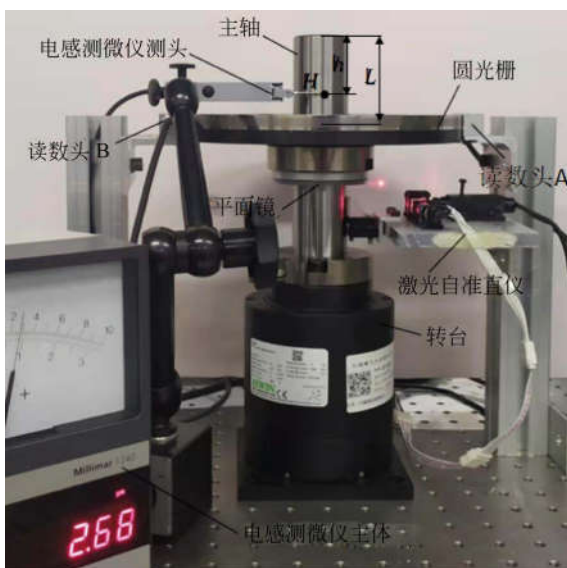


图 7 比对实验装置图
Fig. 7 Comparison experimental setup

在主轴上 H 点采用单向法(使用德国 Mahr 电感测微仪, 分辨率 $0.01 \mu\text{m}$)测量主轴径向回转误差。

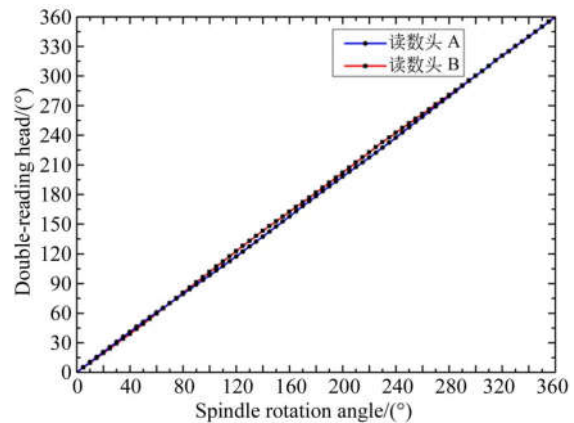
3.1 原始误差测量

在进行比对实验之前, 首先应在双顶尖装置中将光栅与平面镜安装造成的原始系统误差进行测量, 以在后期数据处理中进行分离。

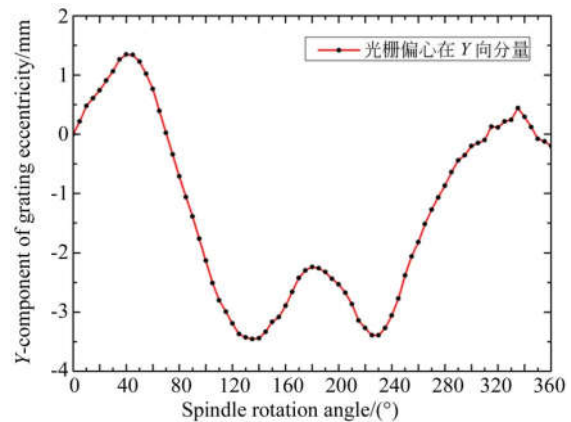
3.1.1 圆光栅安装偏心测量

采用雷尼绍 RESM20-USA200 型双读数头圆光栅, 其半径为 200 mm , 角度分辨率为 0.412 arcsec , 带入公式(3)计算出其径向运动分辨率为 $0.10 \mu\text{m}$ 。

根据图 3 的测量方法, 采用双顶尖测光栅安装偏心。图 8(a)为以顶尖定位夹紧主轴, 从光栅原点开始, 旋转主轴一周, 以 5° 为间隔采集的两



(a) 在顶尖上双读数头数据
(a) Double readhead data on center



(b) 光栅偏重在被测方向上的分量
(b) Eccentric value in the measured direction

图 8 光栅安装偏心测量

Fig. 8 Grating mounting eccentricity measurement

个读数头的角度数据。通过公式(5)计算出圆光栅相对于顶尖孔连线的偏心值在测量方向的分量。如图 8(b)为光栅安装偏心标定结果。

3.1.2 平面镜原始误差测量

采用自制激光自准直仪,按照图 6 方法,以双顶尖固定主轴,从光栅原点开始,旋转主轴一周,以 5° 为间隔,记录各个点处自准直仪的读数。由于顶尖孔轴线为固定,所以此时自准直仪读数的变化完全由平面镜制造与安装等原始误差引起,标定结果如图 9 所示。

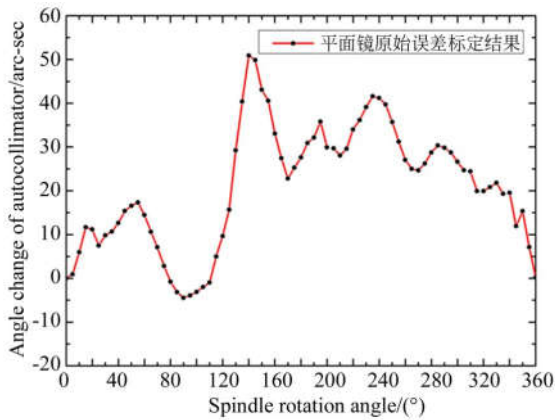


图 9 平面镜原始误差标定结果

Fig. 9 Calibration value of plane mirror

3.2 主轴回转误差测量

3.2.1 圆光栅处主轴径向运动误差测量

如图 10(a)为在转台上双读数头的读数,此读数包含了由于光栅偏心、主轴径向运动引入的角度误差。如图 10(b)为将双读数头的测量数据带入公式(3)计算得出的圆光栅径向运动量,该结果包含光栅偏心与主轴径向运动误差两部分。消除光栅偏心后可得到主轴在光栅处的径向运动误差,如图 10(c)所示。

3.2.2 主轴偏摆角测量

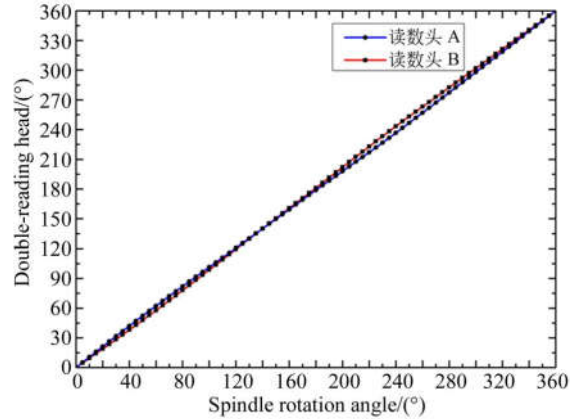
采用自准直仪测得的平面镜角度变化数据如图 11(a)所示,根据公式(9)减去平面镜原始误差,得到主轴回转运动时的偏摆角,如图 11(b)所示。

已知光栅处主轴径向跳动误差以及主轴运动偏摆角误差,便可根据公式(10)推导出主轴上任意一点 H 的径向运动误差。

3.3 实验验证

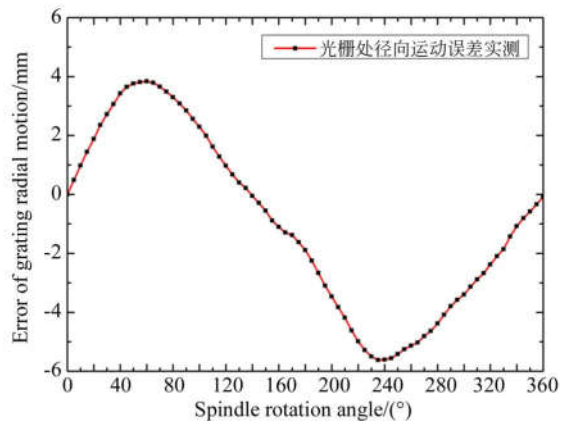
在图 7 中,分别取 $h=46\text{ mm}$, 60 mm , $L=$

125 mm 采用本文方法与传统单向法进行对比,结果如图 12 所示。



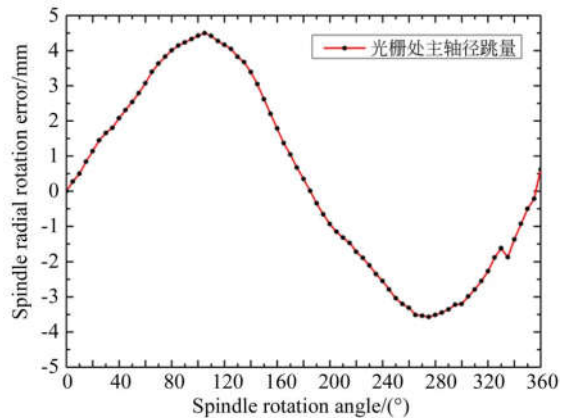
(a) 双读数头读数

(a) Double readhead data



(b) 光栅处径向运动误差实测值

(b) Radial motion error measured at the grating



(c) 光栅处主轴径向回转误差

(c) Spindle radial rotation error at the grating

图 10 光栅处主轴径向回转误差测量

Fig. 10 Measurement of spindle radial rotation error at grating

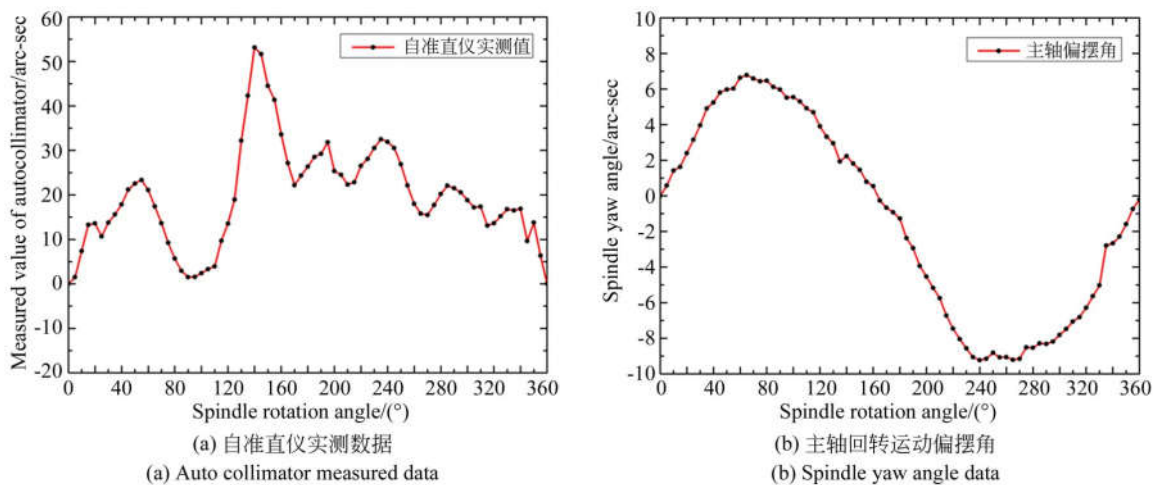


图 11 主轴偏摆角测量
Fig. 11 Measurement of spindle yaw angle

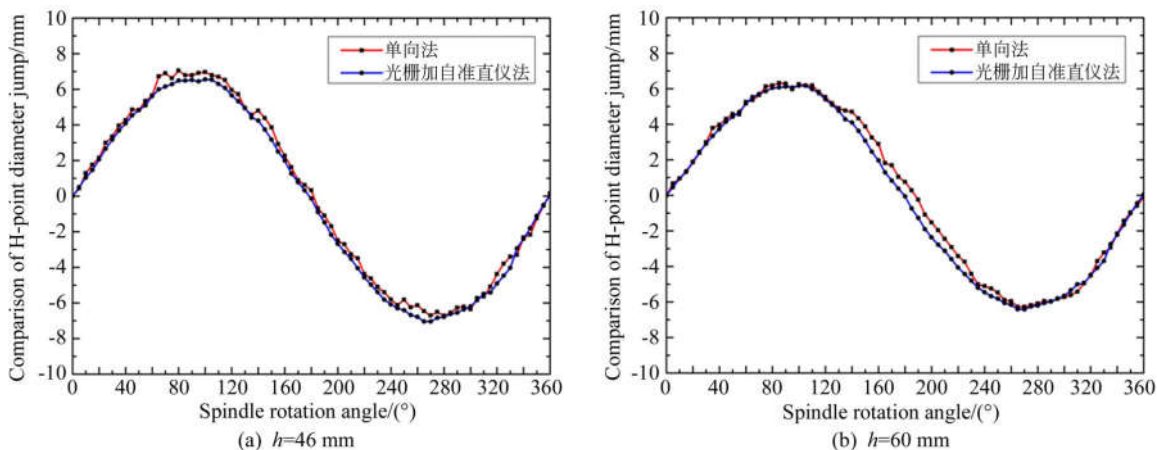


图 12 不同点处主轴回转误差对比结果
Fig. 12 Comparison of rotation error at different points

上述数据均为 4 次测量取平均值结果,从多次测量结果可以看出本方法具有较高的重复性。由以上比对结果可知本方法与传统径向回转误差测量方法具有非常高的吻合度,最大残差在 $1 \mu\text{m}$ 以内,符合本实验要求的精度。

4 结 论

本文提出了一种采用对径双读数头圆光栅配合激光自准直仪直接测量主轴回转误差的方法。本方法采用双读数头圆光栅测量主轴径向跳动;采用激光自准直仪测量主轴偏摆角。根据主轴上一点的径跳和在此方向上的偏摆角,推导出了主轴上任意一点的径向回转误差计算公式。

文中介绍了对径双读数头测量主轴径向运动误差的原理。自行搭建了微型激光自准直仪,采用奥特梅尔商用光电自准直仪对其进行了 $\pm 100''$ 测量范围内的灵敏度标定,标定残差在 $\pm 0.8''$ 以内,满足测量要求。最后为验证本方法的准确性,设计与传统单向法测主轴回转误差的比对试验。实验中,通过顶尖装置标定了光栅安装偏心、平面镜制造和安装引入的原始系统误差;搭建了主轴径向回转误差测量装置;进行了主轴径向回转误差测量比对实验。实验结果表明,在主轴径向回转误差为 $\pm 12 \mu\text{m}$ 时,本文方法与传统单向法比对残差在 $1 \mu\text{m}$ 以内,验证了本方法的可行性。与现有主轴径向运动误差测量方法相比,该方法无需采用标准球,可以实现在线测量,并且,本测量装置可以嵌入到精密转台中,对于现有自

带双读数头的主轴回转装置,只需增加一个低成

本的自准直仪便可实现主轴运动状态的检测。

参考文献:

- [1] 毛剑峰,邹赜,周勤之.基于球标法的高精度主轴回转误差测量[J].组合机床与自动化加工技术,2013(12):108-111.
MAO J F, ZOU K, ZHOU Q ZH. Measurement of rotation error of high-precision spindle based on ball-calibration method[J]. *Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique*, 2013(12):108-111. (in Chinese)
- [2] MA P, ZHAO C M, LU X H, *et al.*. Rotation error measurement technology and experimentation research of high-precision hydrostatic spindle[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2014, 73(9/10/11/12): 1313-1320.
- [3] 张旭栋,徐增豪,施文军,等.机床主轴回转误差测试研究[J].机械制造,2010,48(09):68-70.
ZHANG X D, XU Z H, SHI W J, *et al.*. Research on machine tool spindle rotation error test[J]. *Machine Manufacturing*, 2010,48(9):68-70. (in Chinese)
- [4] 王世良.超精密车床主轴回转误差测试系统的研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2016.
WANG SH L. *Research on Measurement System of Ultra Precision Lathe Spindle Rotation Error*[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016. (in Chinese)
- [5] 刘敏.超精密主轴回转精度测试研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2007.
LIU M. *Research on Measurement of Rotating Error of Ultra Precision Spindle*[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2007. (in Chinese)
- [6] MARSH E R, ARNESON D A, MARTIN D L. A comparison of reversal and multiprobe error separation[J]. *Precision Engineering*, 2010, 34(1): 85-91.
- [7] 张景和,冯晓国,刘伟.用反向法测轴系回转误差[J].光学精密工程,2001(2):155-158.
ZHANG J H, FENG X G, LIU W. Measuring the rotation error of the spindle system by the reverse method[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2001(2): 155-158. (in Chinese)
- [8] 姚俊,王平.主轴回转精度测量方法[J].制造技术与机床,2011(12):176-180.
YAO J, WANG P. Measurement methods of spindle's rotation accuracy[J]. *Manufacturing Technology and Machine Tools*, 2011(12):176-180. (in Chinese)
- [9] 张恩忠.多轴精密数控机床误差测量、综合建模及补偿技术的研究[D].长春:吉林大学,2017.
ZHANG EN ZH. *Research on Error Measurement, Comprehensive Modeling and Compensation Technology for Multi-Axis Precision CNC Machine Tools*[D]. Changchun: Ji Lin University, 2017. (in Chinese)
- [10] 黄春霞,曹其新,付庄,等.晶圆对心转台亚微米级径跳误差补偿方法[J].机械工程学报,2008(9):123-127.
HUANG CH X, CAO Q X, FU ZH, *et al.*. Sub-micron radial runout error compensation method for the turntable in a wafer prealigner[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2008(9): 123-127. (in Chinese)
- [11] 叶建华,高诚辉,江吉彬.五轴机床旋转轴误差的在机测量与模糊径向基神经网络建模[J].光学精密工程,2016,24(4):826-834.
YE J H, GAO CH H, JIANG J B. On-machine measurement and fuzzy RBF neural network modeling for geometric errors of rotary axes of five-axis machine tools[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016,24(4):826-834. (in Chinese)
- [12] ALESSANDRO V, GIANNI C, ANTONIO S. Axis geometrical errors analysis through a performance test to evaluate kinematic error in a five axis tilting-rotary table machine tool[J]. *Precision Engineering*, 2015, 39: 224-233.
- [13] CAPPAS S, REYNAERTS D, AL-BENDER F. A sub-nanometre spindle error motion separation technique[J]. *Precision Engineering*, 2014, 38(3): 458-471.
- [14] 雷大江,岳晓斌,崔海龙,等.金刚石刀具刀尖圆弧波纹度的测量及评价[J].光学精密工程,2017,25(10):2697-2705.
LEI D J, YUE X B, CUI H L, *et al.*. Measurement and evaluation of tool tip arc waviness of diamond tool[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2017, 25(10): 2697-2705. (in Chinese)
- [15] 杨赫然,郭学庆,孙兴伟.机床主轴径向回转误差的测量与研究[J].重型机械,2017(6):37-41.
YANG H R, GUO X Q, SUN X W. The measurement and research of machine tool spindle radial

rotation error[J]. *Heavy Machinery*, 2017(6): 37-41. (in Chinese)

- [16] 朱永生, 岳鹏飞, 闫柯, 等. 精密主轴动态回转误差的实验研究[J]. *机床与液压*, 2015, 43(7): 18-21, 81.
ZHU Y SH, YUE P F, YAN K, *et al.*. Experimental study on the dynamic error motion of the precise spindle system[J]. *Machine Tool & Hydraulics*, 2015, 43(7): 18-21, 81. (in Chinese)
- [17] 娄云鹤, 严隽藩, 陈伟伟. 提高测角精度的双读数头转台设计[J]. *机械制造*, 2015, 53(1): 17-19.

LOU Y G, YAN J F, CHEN W W. A design to improve the angle measurement accuracy by the double reading head rotary table[J]. *Machinery*, 2015, 53(1): 17-19. (in Chinese)

- [18] 艾晨光, 褚明, 孙汉旭, 等. 基准圆光栅偏心检测及测角误差补偿[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(11): 2479-2484.
AI CH G, CHU M, SUN H X, *et al.*. Eccentric testing of benchmark circular grating and compensation of angular error[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(11): 2479-2484. (in Chinese)

作者简介:



娄志峰(1978—),男,黑龙江肇东人,博士,硕士生导师,1999年、2008年于大连理工大学分别获得学士、博士学位,现为大连理工大学副教授,主要从事机械装备精密测量与微小组件自动装配技术等研究工作。E-mail: louzf@dlut.edu.cn



郝秀朋(1990—),男,河北邯郸人,研究生,2016年于河北农业大学获得学士学位,现为大连理工大学机械工程学院研究生,主要从事精密测量方面的研究。E-mail: xphao0909@163.com