

主轴动态回转误差测量技术

金岸, 缪寅宵, 刘冬冬, 林杰, 金鹏, 王雷

引用本文:

金岸, 缪寅宵, 刘冬冬, 等. 主轴动态回转误差测量技术[J]. *光学精密工程*, 2020, 28(10): 2227–2243.

JIN An, MIAO Yin-xiao, LIU Dong-dong, et al. Research on spindle dynamic rotation–error–measurement technology[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2020, 28(10): 2227–2243.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/OPE.20202810.2227>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

圆光栅配合自准直仪测量主轴径向运动误差

Spindle radial motion error measurement using a circular grating and a autocollimator
光学精密工程. 2019, 27(9): 2053–2061 <https://doi.org/10.3788/OPE.20192709.2053>

基于球杆仪检测五轴数控机床主轴的热误差

Thermal error measurement of spindle for 5–axis CNC machine tool based on ball bar
光学精密工程. 2015, 23(5): 1401–1408 <https://doi.org/10.3788/OPE.20152305.1401>

机床主轴热设计研究综述

Review on thermal design of machine tool spindles
光学精密工程. 2018, 26(6): 1415–1429 <https://doi.org/10.3788/OPE.20182606.1415>

精密数控车床主轴热误差建模

Thermal error modeling for spindle system of precision CNC lathe
光学精密工程. 2016, 24(7): 1731–1742 <https://doi.org/10.3788/OPE.20162407.1731>

砂轮偏心信号的高精度检测方法

High accuracy detection algorithm for eccentric signal of grinding wheel
光学精密工程. 2016, 24(10s): 20–27 <https://doi.org/10.3788/OPE.20162413.0020>

文章编号 1004-924X(2020)10-2227-17

主轴动态回转误差测量技术

金 岸^{1,2}, 缪寅宵^{1,3}, 刘冬冬^{1,4}, 林 杰^{1,2}, 金 鹏^{1,2*}, 王 雷^{1,2}

(1. 哈尔滨工业大学 超精密光电仪器工程研究所, 黑龙江 哈尔滨 150080;

2. 超精密仪器技术及智能化工业和信息化部重点实验室(哈尔滨工业大学), 黑龙江 哈尔滨 150080;

3. 北京航天计量测试技术研究所, 北京 100076;

4. 92493 部队计量测试研究所, 辽宁 葫芦岛 125000)

摘要: 高速电主轴是一种将传统机械主轴中主轴电动机和机床主轴合而为一的新式主轴, 因具有高速高精度的优点被大量应用于高性能加工中心。高速电主轴的动态回转特性在很大程度上决定了加工精度, 是影响加工中心综合性能的重要因素。主轴运动误差测量方法大致可分为基于位移传感的主轴回转误差测量和基于光学手段的主轴回转误差测量。两类测量手段都是通过测量主轴回转一定角度的位移变化量来解析出主轴的径向回转误差, 这两类测量方法在主轴低速运转时具有很好的测量效果。当高速电主轴处于高速工作状态时, 这两类测量方法的测量效果将受到传感器采样频率的限制。本文在总结现有主轴回转误差测量的基础上, 提出了一种基于靶标轨迹追踪的主轴动态回转误差测量方法, 对现有技术进行了总结, 并对未来的发展趋势进行了展望。

关键词: 精密测量; 主轴; 回转误差; 动态参数计量; 靶标轨迹追踪

中图分类号: TB921; TH711 **文献标识码:** A **doi:** 10. 37188/OPE. 20202810. 2227

Research on spindle dynamic rotation-error-measurement technology

JIN An^{1,2}, MIAO Yin-xiao^{1,3}, LIU Dong-dong^{1,4}, LIN Jie^{1,2}, JIN Peng^{1,2*}, WANG Lei^{1,2}

(1. *Center of Ultra-Precision Optoelectronic Instrument, Harbin Institute of Technology, Harbin 150080, China;*

2. *Key Lab of Ultra-precision Intelligent Instrumentation (Harbin Institute of Technology), Ministry of Industry and Information Technology, Harbin 150080, China;*

3. *Beijing Aerospace Institute for Metrology and Measurement Technology, Beijing 100076, China;*

4. *92493 Army Metrology and Test Research Institute, Huludao 125000, China)*

* *Corresponding author, E-mail: p. jin@hit.edu.cn*

Abstract: High-speed electric spindle is a novel spindle that combines the drive and transmission units of the conventional spindle. The high-speed electric spindle is widely used in high-performance machining centers because of its high speed and high precision. The dynamic rotation characteristics of the spindle greatly determine the machining accuracy of the machining center; thus, it is an important factor that affects the overall performance of the machining center. The research is roughly divided into

收稿日期: 2020-01-07; 修订日期: 2020-02-09.

基金项目: 国家重点研发计划资助项目 (No. 2016YFF0200700)

two types, namely, spindle rotation-error measurement based on displacement sensing and that based on optical methods. These measurement methods aim to determine the radial rotation error of the spindle by measuring the displacement change in the spindle at a certain angle. These two measurement methods exhibit good measurement performance when the spindle is running at a low speed. However, when the spindle is operating at a high speed, measurement becomes difficult because of the limitation in the sampling frequency. According to the summary of the methods that measure the spindle rotation error, we propose a measurement method for spindle dynamic rotation error based on target trajectory tracking. Finally, we summarize the existing technology and discuss future research prospects.

Key words: precision measurement; spindle; rotation error; dynamic parameter measurement; target trajectory tracking

1 引言

在以集成电路生产为代表的半导体加工领域中,新型集成电路器件正向着高集成化、高密度化和高性能化的方向发展。电子产品在集成度、运行速度和可靠性不断提高的同时也向着轻薄短小的方向发展。与此同时,新型半导体封装技术不断涌现,这些先进的封装技术对晶圆的品质提出了更高的要求。在半导体制程中,需要先将晶圆减薄并切割成一个个独立的单元,然后将这些单元制成不同的半导体封装结构,即芯片。晶圆减薄与晶圆切割是半导体封装工艺中的关键制程,因此整个工艺的产能主要依赖于减薄机和划片机的品质。

减薄机与划片机中的核心部件是高速主轴。近年来,在高端数控机床领域出现的高速电主轴,是将机床主轴与主轴电机融为一体的新技术。高速数控机床主传动系统取消了带传动和齿轮传动,机床主轴由内装式电动机直接驱动,从而把机床主传动链的长度缩短为零,实现了机床的“零传动”。这种主轴电动机与机床主轴“合二为一”的传动结构形式,使主轴部件从机床的传动系统和整体结构中相对独立出来,因此可做成主轴单元。高速高精度电主轴具有转速快、轴系精度高、使用寿命长、运转平稳等优点,因而主要应用于半导体加工装备和超精密机床等高端加工制造领域。

随着半导体加工技术和超净加工技术的发展,该领域对高速超精密主轴的技术需求也日益增加。主轴转速从几千转每分钟上升到几万转每分钟,主轴的轴系精度也在不断提高。例如径向

回转误差从几百微米降低到几十微米甚至几微米。英国 Loadpoint 公司生产的减薄机中主轴最高转速达 120 000 r/min;日本 DISCO 公司生产的划片机中主轴最高转速高达 60 000 r/min,轴系的径向回转误差优于 $2 \mu\text{m}$ 。

在用于半导体晶圆加工的划片机中,主轴的径向回转误差会导致划片深度的变化,可能导致切割深度不足,晶圆无法顺利分离,或者切割深度过大,导致晶圆损坏,过大的径向回转误差甚至会损毁划片机刀具。主轴的轴向回转误差会引起划片走向的偏移,导致晶圆切割不规则。在减薄机中,主轴的轴向回转误差会影响刀片在减薄方向上的线性进给,从而影响晶圆的表面粗糙度甚至破坏晶圆。通过测试与分析主轴的回转特性,可以预测机床加工工件所能达到的形状误差及表面粗糙度,从而对机床加工误差进行补偿控制。此外,对主轴回转特性的测试与分析还可以用于主轴运转状态的判断,诊断主轴故障。因此,测量高速主轴动态回转特性相关的参数具有重要的现实意义。

2 主轴回转误差测量方法

在机床生产的早期阶段,还没有一种广为接受的机床性能测试方法,要实现可靠的加工精度是十分困难的。20 世纪 20 年代末,德国工程师 Schlei. singer 博士提出了第一批标准化测试(DIN)用来检测制造机床的零件^[1]。Schlei. singer 具有开拓性的想法,获得了机床行业的广泛认可。虽然同样的测试方法至今仍在沿用,但它们却无法测量出机床的实际性能。直到 20 世纪 50

年代,第一批检测机床性能方法的出现,这一问题才得以解决。在家乡捷克斯洛伐克工作时, Schlei. singer 与 Tlusty 博士共同开发了一种动态测量机床主轴误差运动的方法,该方法简称为 Tlusty 法^[2]。后来,主轴旋转法替代了 Schlei. singer 的基础质量检测方法,使得人们意识到当把主轴用于机械加工时,主轴会怎样运作。20 世纪 60 年代至 70 年代, Tlusty 博士陆续开发出了很多项测试技术,成功地将机床性能与机床所生产的零件关联起来^[3-5]。到了 20 世纪 80 年代,“柔性制造”成为研究热点,过去以零件性能取胜的做法不再实用。在车间开始使用新机床制造零件之前,机床用户便开始询问机床整体性能是否有保障。劳伦斯利弗莫尔国家实验室的 Bryan 博士开发了校准机床精度的工具和技术,他发明了伸缩球杆仪,这项发明后来成为验证机床性能的一种重要工具^[6]。Bryan 提倡采用更精确的方法来验证机床性能,并一直强调测量主轴误差运动的重要性,而不是主轴光亮表面的跳动^[7]。因此,该领域的研究方向逐渐转移到主轴本身误差运动的测量上,所采用的技术手段大致分为两类。一类是以位移传感器与标准器为核心器件,将标准器轴心与主轴回转轴心重合安置,将位移传感器安置在标准器的径向上,以固定回转角度为步进控制主轴转动。以特定角度为相位零点,用位移传感器测量主轴回转一周过程中标准器与位移传感器之间的位移变化量,并以此为基础解析出主轴径向回转误差。另外一类是以激光器、标准球和光电探测器为核心器件,通过光路设计与精密装调,将激光照射到标准球上,反射光被光电探测器采集,通过评价主轴回转过程中光电探测器上的光强变化来评价主轴径向回转误差。

2.1 基于位移传感的主轴回转误差测量

三点法是一种广泛应用的误差分离技术,由日本学者青木保雄和大圆成夫在 1966 年首次提出^[8]。该方法成为多点法误差分离技术中一个经典的误差分离方法,国内外许多学者对该方法进行了大量的研究,使三点法误差分离技术的应用得到了很大的提高和推广。1972 年, Donaldson 首次提出反向法误差分离技术,对主轴回转误差和被测工件的形状误差进行分离^[9]。反向法后来也发展成为一种广泛应用的误差分离技术。

20 世纪 90 年代, Noguchi 等人提出了矢量

指示法,用垂直于轴线的平面上的矢量来表示和计算主轴的径向回转误差运动^[10]。实验中,用两个相互垂直的位移传感器对固定在主轴端面的标准球进行测量,并开发一种算法来获取主轴轴线位移的瞬时矢量。以矢量指示法表征主轴运动误差可以获得比传统方法“李萨如”图更精确的结果。1996 年, Gao 等人首次提出混合法测量圆度误差,即用两个线位移传感器和一个角位移传感器同时进行测量,测量原理如图 1 所示^[11]。与三点法相比,混合法能够将圆度误差和主轴的回转误差进行完全分离,也能很好地测出表面形貌里的高频成分。在此之后, Gao 等人基于混合法提出新的误差分离方法——正交混合法,该方法只用一个线位移传感器和一个角位移传感器,相互成 90° 布置^[12]。正交混合法是对混合法的改进,其传感器布置更为简单,测量效果在实验中也得到了印证。

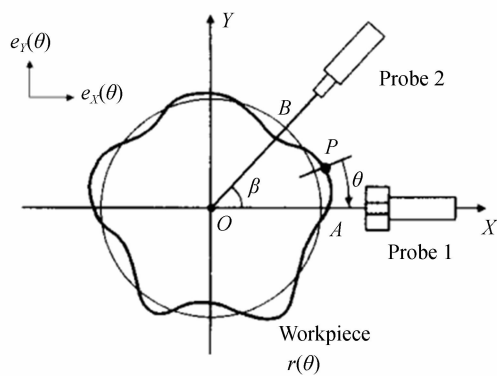


图1 混合法的测量原理^[11]

Fig. 1 Principle for mixed method^[11]

2005 年, Grejda 等人对 Donaldson 提出的反向法进行了改进,将被测主轴安装在转盘上,并在主轴和工件之间使用特殊的卡盘(称为反转卡盘),如图 2 所示^[13]。被测主轴的定子相对于工件和量规旋转,而不是像传统方法那样相对于主轴的定子旋转量规和工件。该方法通过设计新的转台形式减少了位移传感器的移动和调整,可靠地消除由热漂移和空气轴承供气压力波动引起的低频成分。此方法测得的结果重复性误差优于 1 nm。

2007 年, Gao 等人基于双探头主轴误差测量设计了一套金刚石车床主轴误差测量和运动补偿系统,通过补偿加工获得了很好的工件表面平整

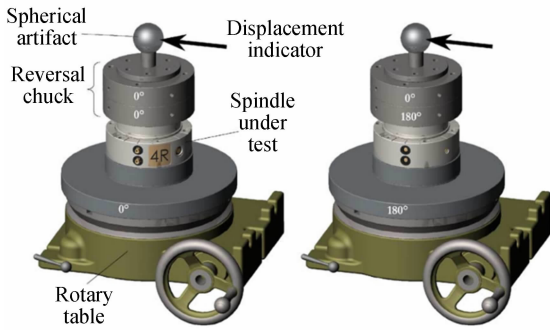


图 2 无需重新放置位移传感器进行 Donaldson 反向操作^[13]

Fig. 2 Donaldson reversal using a rotary table to eliminate the need for relocating the displacement sensor^[13]

度^[14]。2010年, Marsh等人对反向法和多点法误差分离技术进行了实际测量及比较, 文中重点研究这两种误差分离算法对纳米级误差分离的可行性, 实验验证了它们对主轴回转误差和工件表面形状误差亚纳米级分离的可靠性和可重复性^[15]。2012年, Gao等人提出了一种主轴误差运动测量系统来评估一个大型精密轧辊车床的主轴, 利用反转法分离形状误差和主轴运动误差, 通过对不同截面数据的测量, 计算主轴的径向运动误差和倾角运动误差^[16]。2012年前后, 美国雄狮精仪公司研发了一套五自由度主轴回转误差分析仪, 采用5个电容位移传感器对双标准球杆进行测量。每个标准球布置两个互为90°的传感器, 轴端的标准球轴向位置布置一个传感器, 完成主轴径向运动误差、倾角运动误差和轴向运动误差的测量。



图 3 雄狮精仪公司的 5 探头主轴测量仪

Fig. 3 Five-probe SEA of Lion Precision

2014年, Cappa等人利用一种新的误差分析方法比较和评估各种已知的多探头测量技术^[17]。他们提出了一种新式的多探头测量技术, 在测试

过程中并不需要对标准器及传感器的准确定位, 并且对不同传感器灵敏度具有鲁棒性。

国内于 20 世纪 80 年代前后开始对主轴回转参数计量技术的研究。1978 年, 哈尔滨工业大学蔡鹤皋对主轴回转运动精度进行研究, 系统地描述了主轴回转运动精度的各个概念, 并前瞻性地指出应当对主轴的动态参数进行测量^[18]。蔡鹤皋指出, 主轴回转运动精度测量可以分为静态测量法和动态测量法。当对以正常速度运转的主轴状态进行测量时, 才反映出主轴回转运动的真实情况。1982 年, 重庆大学钟先信指出传统主轴回转运动精度测量中的两个问题^[19]: 一是静态测量与动态工作状态不一致, 往往测量精度高而工作精度低; 二是标准球的形状误差及安装偏心都反映在测量值中, 应当进行分离。1983 年, 上海交通大学洪迈生介绍了用三点法临床分离机床主轴径向误差运动和工件形状误差的数学原理和分析方法^[20], 提出将傅里叶变换应用到误差分离中。1990 年, 清华大学叶京生等人研究了多步法误差分离技术的原理性误差和测量精度^[21], 从理论和实验证实了多步法能够完整地分离主轴回转误差和被测件的圆度误差, 有效地提高了圆度仪的测量精度。1995 年, 哈尔滨工业大学王晓慧等人提出了实时测量机床主轴回转误差的方法, 并建立了一套在线测量及补偿系统^[22], 实验表明, 加入在线测量及补偿后, 加工工件的圆度误差平均改善了 40%, 圆柱度误差平均改善了 23%。1997 年, 洪迈生提出时域二点法来分离圆度误差和回转误差^[23]。对布置在测试件周向的接近 180° 的两个传感器的测量数据进行时域上的分离, 并进行实验对比该方法和频域三点法测量结果的差别, 证明了该方法的有效性。1999 年, 中国船舶工业总公司 6354 所闾光萍介绍了双向转位法测量主轴的径向回转误差^[24], 该方法实质为反向法的应用。闾光萍从测量仪器读数误差的角度对安装偏心的大小与分离精度关系进行了研究。2000 年, 第三军医大学陈海斌等人提出了正弦回归法分离标准球的安装偏心, 利用反向法进行误差分离, 剔除标准球的形状误差, 实现了主轴回转精度评定^[25]。2000 年, 洪迈生等人提出了时域三点法进行误差分离, 相对于频域三点法, 此方法避免了正逆两次傅里叶变换, 分离速度更快。由于此方法是在频域三点法的基础上建立的, 在实验前同

样要用频域三点法中的权函数来检验三个传感器安装位置对谐波的抑制问题。其时域分离是一个迭代的过程,迭代初值的确定是时域分析的一个掣肘问题,其原理性误差的根源是迭代初值的不确定性^[26]。2001年,哈尔滨工业大学谭久彬等人对回转基准中存在的问题进行了分析,并分析了多步法误差分离技术的原理误差,提出鉴相法误差分离技术,扩展了无谐波抑制范围,并简化了测量过程和系统^[27]。2002年,国防科技大学李圣怡等人提出用两点法误差分离技术分离超精密车床主轴回转误差和圆度误差的方法,建立相应的数学模型并进行仿真^[28]。该测试系统只是从主轴敏感方向测量,应用受到一定局限,主要用来评价主轴的工作精度和预测车床在理想加工条件下所能达到的最小形状误差。李圣怡等人基于上述计算仿真,还对超精密车床主轴回转误差运动进行了测试,实验表明回转误差运动中二次分量占主要成分^[29]。与此同时,洪迈生等人采用机床本身加工的工件作为被测试件,利用三点法频域误差分离技术对主轴的回转误差和被测试件的形状误差进行分离,采用自适应阈值的小波包算法除掉加工时存在的噪声,从谐波抑制特性和总体频域特性两个方面分析测量系统的频域特征,以此实现主轴径向运动误差的在线误差测量^[30]。2003年,洪迈生等人继续使用频域三点法进行主轴回转误差运动的测量^[31],提出了先使用频域法确定工件表面形状误差的误差初值,然后用时域三点法测量数控机床主轴运动误差的新方法,该方法有效解决了限制时域三点法应用的初值问题。2004年,长春工业大学梁淑卿等人采用双向测试法对主轴的回转精度进行动态测试^[32]。该方法应用曲线拟合法对测量信号中与转速同频的偏心运动和主轴误差运动中的一次误差运动进行了有效的识别分离,消除了偏心运动,实现了主轴误差的准确评定。

2012年, Samuel 在前述工作的基础上,提出了一种基于模型的曲线拟合方法,在时域中准确地解释和分析主轴误差测量数据,并与常用的基于离散傅里叶变换的频域滤波方法进行了比较,该方法为主轴误差数据的基频估计提供了更高的分辨率^[33]。2013年, Lan 等人采用两个非接触式电容传感器来测量旋转主轴的径向跳动^[34]。2015年, Wu 等人提出了一种改进的两点测量方

法,用于高速镗杆的径向微位移测量,该系统由两个正交位移传感器和一个角度编码器组成^[35]。2017年, Zhao 等人提出了求解多变量方程法(SSME),简化了传统三探针方法的数学处理过程,提出了一种新的三探针测量方法,该方法对常规三探针法难以测量的角度具有良好的鲁棒性^[36]。

上述方法大多基于大圆成夫所提出的“三点法”。尽管学者们尝试采用不同的方法对此进行改进,但仍然不可避免地存在两个方面的缺陷。首先,基于多探头(位移传感器)的主轴运动误差测量系统需要配合标准球或其他标准器完成,因此不可避免地引入标准器自身轮廓的误差以及安装误差;第二,为了准确地评价主轴回转运动误差,需要位移传感器在主轴回转一周的时间里采集足够多的信息。但是当主轴以工作状态运行时,受采样频率限制,位移传感器并不能够完成足够的信息采用。假设被测主轴转速超过 60 000 r/min,主轴轴心点的晃动频率为 1 kHz,传感器的采样频率应高于 72 kHz,才能满足测量的基本要求,而目前具有高采样频率的位移传感器成本极高,难以制造。

2.2 基于光学手段的主轴回转误差测量

2004年, Liu 等人使用自制的激光二极管装置替代了传统方法中的标准球,配合位置敏感探测器组成了一种新式的光学测量系统来对主轴回转误差进行测量,测量装置如图 4 所示^[37]。

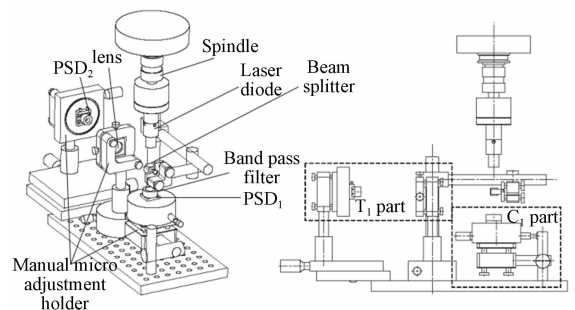


图4 Liu 等人提出的测量装置^[37]

Fig. 4 Schematic plot and coordinate definition proposed by Liu *et al.* ^[37]

2007年, Fujimaki 等人开发了一种基于激光二极管和四象限光电探测器的光学测量系统,用于测量微型机床中主轴的径向跳动^[38]。该方法

中,激光二极管出射的光束通过分束器会聚到标准球上,通过评估标准球的反射光在 QPD 上的位移偏移量完成对主轴径向回转误差的测量,实验装置如图 5 所示。

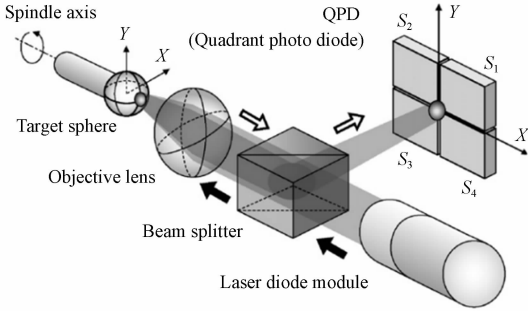


图 5 Fujimaki 等人提出的光学测量系统装置图^[38]

Fig. 5 Optical layout for radial error measurements proposed by Fujimaki *et al.*^[38]

基于类似的测量原理,Castro 在 2008 年提出将激光干涉仪用于测量车床主轴旋转中的径向误差和轴向误差^[39]。类似于雄狮精仪公司的测量手段,Murakami 等人于 2010 年提出了一种用于测量高速微型主轴的五自由度误差运动的测量系统,该系统包括棒透镜、球透镜、4 个分开的激光束和多个分开的光电二极管^[40],测量装置如图 6 所示。

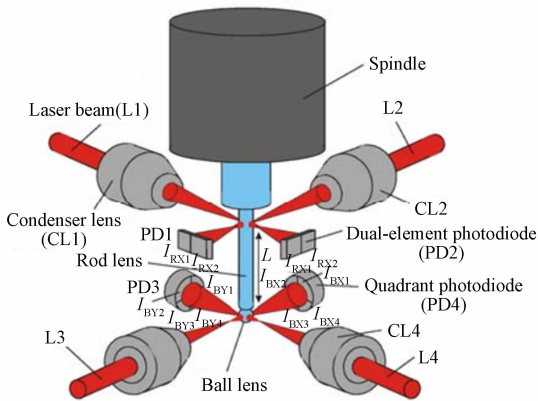


图 6 高速微型主轴五自由度误差运动光学测量系统^[40]

Fig. 6 Optical measurement system of five-DOF error for high-speed micro spindle^[40]

2012 年,Ozdoganlar 等人提出一种基于激光多普勒测振仪(Laser Doppler Vibrometer, LDV)

对微加工设备中超高速主轴的径向回转误差进行测量的技术^[41]。该方法将精密标准圆柱固定在主轴的回转端面上,控制主轴以其工作转速运行,使用两个 LDV 来测量标准圆柱轴向上两个不同位置处的径向运动,测量装置如图 7 所示。然后,对测得的径向运动进行处理,以获得主轴的径向误差运动。

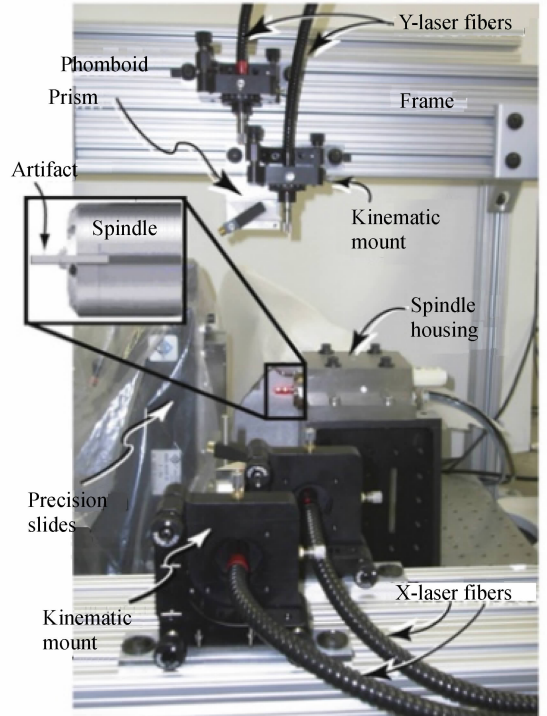


图 7 基于 LDV 的主轴径向回转误差测量设备^[41]

Fig. 7 Measurement setup for radial motion measurements based on LDV^[41]

2013 年,Ozdoganlar 等人对上述方法进行了改进,将原有的精密标准圆柱改进为轴向端面安置有精密标准球的球杆型标准器件,新标准器件如图 8 所示^[42]。此举将原有的两点测量改进为单点测量。同年,他们基于这种方法对超高速微加工主轴的误差运动进行了分析^[43]。课题组分析了由于温度波动带来的影响,由于主轴转速改变带来的影响,以及轴承接触缺陷和工件安装误差带来的影响。并得出如下结论:(1)主轴长时间运行时,温度波动呈现周期性,显著影响主轴的运动误差;(2)主轴的转速和被测标准器悬垂的长度显著影响主轴的运动误差。

2016 年,Ozdoganlar 等人对基于 LDV 的测

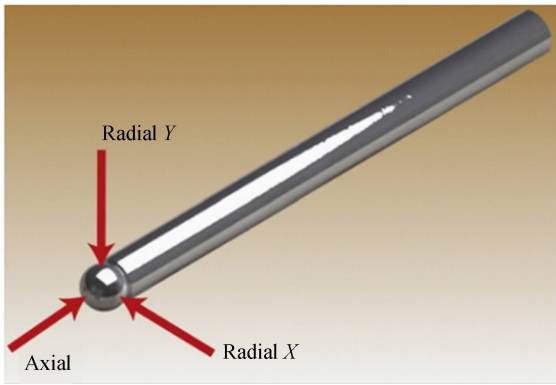


图 8 Ozdoganlar 等人提出的改进型标准器件^[42]

Fig. 8 Model for diameter sphere-on-stem precision artifact fabricated to conduct axial and radial motion measurements^[42]

量方法进一步完善,提出了一种多方向误差分离技术,以获得微型超高速主轴的径向误差运动^[44]。与前述的方法不同,该技术既不依赖于高精度夹具,也不需要从工件的特定方向进行测量。而是使用 LDV 从工件任意方向测量主轴误差运动,测量步骤如图 9 所示。每个工件相对于主轴的方向设置角度是通过使用另一个 LDV 对在工件和主轴上所做的标记进行反射率测量而高精度确定的。

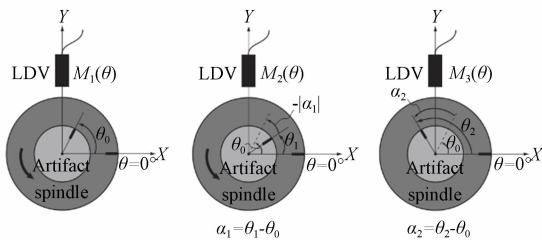


图 9 采用三重定向时多定向技术中涉及的步骤^[44]

Fig. 9 Steps involved in multi-orientation technique when using three re-orientations^[44]

2013 年, Garinei 等人优化了一个基于光电传感器的测量系统设置,来测量高速电主轴转子的振动误差^[45]。该方法指出可以通过建模获得转子的完整动态特征,并精确测量轴振动以跟踪转子的振动模式。2017 年, Ashok 使用机器视觉直接实现了高速主轴成像测量^[46]。他们的方法有效地避免了复杂的测量系统,不需要具有高采样频率的电容传感器,该方法仅对最大转速为 25 r/min 的被测主轴有效。

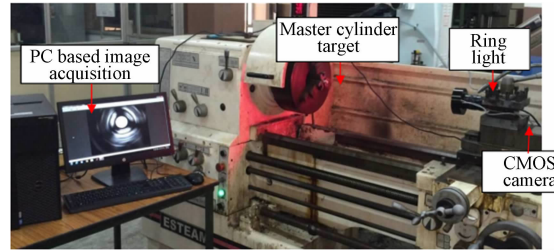


图 10 基于机器视觉实现机床主轴回转误差测量^[46]

Fig. 10 Experimental arrangement for spindle radial error measurement using vision system in a lathe^[46]

2019 年, 姜志峰课题组提出了一种在线非接触式测量主轴径向回转误差的方法。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。该方法与传统方法的测量精度相当,并且无需采用标准球,有效避免了标准球表面粗糙度、圆度等对测量结果的影响^[47]。

与基于位移传感器的测量方式不同,上述方法大多是基于激光二极管和光电探测器实现的。这种方式很好地解决了传统方式应用于高速主轴动态参数测量时采样频率不足的问题,却不能解决测量过程中引入标准器自身精度及安装误差的问题。

3 主轴回转误差的数据处理和应用

3.1 混叠误差分离

不论是基于位移传感的测量方式,还是基于光学手段的测量方式,标准器都是不可或缺的。标准器的使用必定会引入标准器自身轮廓的面形误差及安装误差。因此,在测量过程中需要对混叠的误差进行分离。

1997 年, Tu 等人对传统的三探针测量法进行了精确几何建模,并在此基础上进行误差分析^[48],指出了三探针测量法基本方程中所做的近似处理。同时为了减少误差,标准轴的精度应该比主轴运动轴线的精度高十倍,传感器探针的安装误差应该小于主轴运动误差和标准轴尺寸的五十分之一。1999 年,何钦象等人基于复数频域分析建立主轴回转运动数学模型,得出了主轴回转误差运动轨迹方程,定义了回转精度,定量分析了影响主轴回转精度的主要因素。何钦象指出主轴回转运动可用复函数来描述,进而分解为许多作圆周运动的频率分量,主轴的回转中心是主轴上

回转的+1阶分量为零的点,主轴的误差运动不含+1阶分量^[49]。2000年,洪迈生等人在回顾和评述误差分离技术的基础上,用多维误差分离技术理论将此前的多种误差分离技术进行了统一,给出了基于两个映射矩阵的一维和多维误差分离技术的统一方程。据此论述了误差分离的通则,以及误差分离技术的反滤波实质。并且,实现了圆度三点法、圆度转位法、直线乱序式四点法、直线精密三点法、圆度混合三点法、圆柱体五点法、平面混合四点法和摆线齿轮三点法的统一矩阵方程表示^[50]。洪迈生等人于2004年对比了一般多步法的频域解和时域解,讨论了多步法的本质,指出标准器圆度误差和主轴回转误差的多步法误差分离系统本质上是一个可用传递函数描述的并联系统,其分离所得的标准器圆度误差中都存在着谐波损失,且该损失被残留在分离所得的主轴回转误差中。从而提出了一种并联多步法误差分离方法,该方法具有步数和谐波损失较少的优点^[51]。2006年,Marsh等人对Donaldson反向法、多步法及多点法3种常用的误差分离技术在精密主轴和旋转对称工件的纳米级测量方面的应用进行了对比^[52]。通过实验比较了Donaldson反转法、多步法和多探针法,证实了3种方法都能完成纳米级误差分离,其数值误差都优于1 nm。

2003年,陈清等人对以圆柱体作为标准器的主轴径向回转误差测试系统的误差进行了分析,讨论了标准器安装倾斜或偏心引入的误差分量、传感器测头安装偏心引入的误差分量以及测量仪器的线性漂移引入的误差分量等误差源对测量结果的影响,指出主轴偏心运动与测头安装偏心的耦合性^[53]。2008年,彭万欢等人对超精密空气静压主轴回转误差测试过程中标准器的偏心进行了研究^[54],并设计了偏心调整装置,使安装偏心控制在 $1\ \mu\text{m}$ 以下;采用两点法误差分离技术,对比圆度仪测量结果,指出消除偏心只能采用消一次谐波分量的方法,不能用最小二乘法。同样地,徐秀玲等人从消除安装偏心为出发点,通过光学测量系统对主轴的误差运动进行测量,基于此文建立的模型分离出测试件的安装偏心^[55]。

2011年,Lu等人对当下主轴计量中存在的一些问题提出了质疑。在现行的主轴计量标准中,位移传感器所测得信号中的基波分量仅仅被当作是标准器安装偏心引起的误差分量,而径向

回转误差中的基波分量则被忽略不计。课题组讨论了此前主轴运动分析方法的局限性,证明径向误差运动中存在基波,提出了一种二维方法对主轴的径向误差进行分析及实验验证^[56-57]。他们所采用的测量手段与2.1节中所提到的大多数方法并无二致,具体测量结构如图11所示。

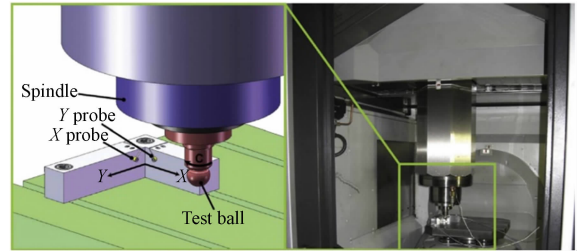


图 11 基于二维分析法实现机床主轴回转误差测量^[57]

Fig. 11 Measurement of spindle error motion based on two-dimensional analysis method^[57]

除此之外,Shu等人对测量过程进行了完整的误差分析,分析了电容式位移探头的非线性误差、探头的对准误差、工件球的偏心误差、环境误差以及由不同的误差分离方法引起的误差^[58]。课题组通过实验研究了针对球形表面的电容式位移探头的非线性,发现探头相对于标准球的横向偏移而导致的探头输出会极大地影响测量精度。

3.2 误差信息的应用

2013年,刘启伟分析了主轴测量中常规的测量误差组成、回转误差的产生原因及它对加工精度的影响,还进行了机床主轴回转精度测量方法及回转误差的评定^[59]。主轴回转过程中的3种跳动对加工件的影响如表1所示。

表 1 机床主轴回转误差产生的加工误差

Tab. 1 Machining errors due to machine spindle rotation errors

基本形式	车削			镗削	
	内外圆	端面	螺纹	孔	端面
径向跳动	影响极小	无影响	影响极小	圆度误差	无影响
轴向窜动	无影响	平面度垂直度	螺距误差	无影响	平面度垂直度
角度摆动	圆柱度误差	影响极小	螺距误差	圆柱度误差	平面度误差

2015年, Lee课题组研究了空气静压轴承主轴误差运动对加工精度的影响^[60]。考虑了不平衡效应, 课题组建立了空气静压轴承主轴动力学模型来表征由不平衡引入的主轴误差运动及其动力学行为。课题组还特别设计了一系列凹槽车削实验来研究由不平衡引入的主轴误差运动。实验结果和理论之间取得了良好的一致性, 结果证实了空气静压轴承主轴误差运动存在低频包络现象, 该现象被认为是主轴振动中两个运动分量在高频下的独特叠加效应。实验结果还表明, 空气静压轴承主轴的旋转轴和刀尖之间的相对距离会随着主轴转速的不同而变化, 从而极大地降低了加工精度。2016年, Lee课题组又对超精密金刚石车削中空气静压轴承主轴平均轴线位置的漂移进行研究^[61]。他们在理论推导和实验验证的基础上研究了空气静压轴承主轴的主轴平均轴线的位移特性, 并建立了主轴轴线回转过程中的误差模型用以分析导致慢刀伺服辅助车削中切削深度误差的原因。课题组还进行了微结构制造实验, 以研究加工过程中沿圆柱形工件的轴向和径向方向的微结构的形貌误差。此外, 课题组还对主轴误差运动进行了分析, 研究了主轴不平衡引起的偏心距和热误差对主轴平均轴线位置漂移的影响。结果表明: 由于流体动力作用, 主轴平均轴线的位置漂移随主轴转速的变化而变化, 并且漂移大小与主轴转速之间的关系是非线性的。

4 基于靶标轨迹追踪的主轴回转误差测量方法

在前人研究的基础上, 本文提出一种基于靶标轨迹追踪法 (Target Trajectory Tracking, TTT) 来测量高速电主轴的动态径向回转误差。该方法采用工业相机和自制的靶标式标准器作为核心器件来测量主轴的动态径向回转误差。

4.1 靶标轨迹追踪法测量原理

基于靶标轨迹追踪的测量原理如图 12 所示。自制靶标式标准器被固定在待测主轴的回转端面, 为了保证主轴高速运行时的动平衡, 应使标准器回转中心与主轴中心轴线高度重合。工业相机被用来采集靶标轨迹图像, 为了减小成像镜头边缘处光学畸变对测量结果的影响, 应使镜头的光轴与主轴回转轴线高度重合。自制靶标式标准器

由硅基靶标片、高亮 LED 及其他配件构成。硅基靶标片为具有微小通孔的厚硅片, 通孔尺寸为 $10\ \mu\text{m}$, 通孔下方装有高亮度 LED 进行照明, LED 由纽扣电池进行供电。由于通孔尺寸极小, 且距离相机较远, 因此被 LED 照亮的通孔可以视作点光源, 亦称作靶标。

由于标准器被规定在主轴回转端面, 因此标准器的运动特性与主轴保持一致。由于靶标为标准器上的一点, 因此其运动特性也与主轴保持一致。当靶标随着主轴回转一周, 其运动轨迹包含主轴轴线径向回转误差的所有信息, 因此可以通过采集该信息来评估主轴的径向误差。

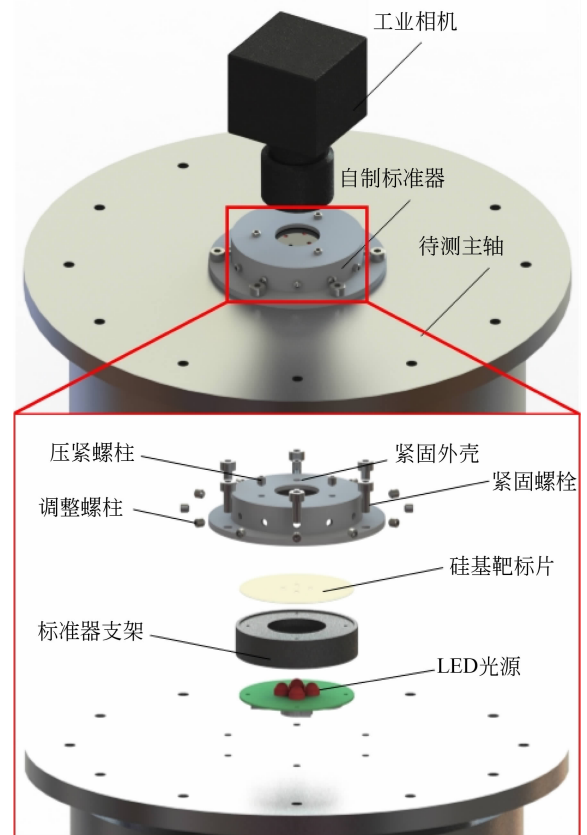


图 12 靶标轨迹追踪法测量原理

Fig. 12 Principle schematic of target trajectory tracking measurement

CCD 的曝光时间由相机快门控制, 在数十微秒到数十秒内进行调节。高速电主轴的回转周期大多为数毫秒或数十毫秒, 因此通过外部触发的方式调整相机快门时间与主轴回转周期一致。完成上述配置后, 可以采集到如图 13 所示的靶标随

着主轴回转一周的轨迹。由于原始图像对比度极低,无法分辨靶标轨迹,图 13 为经过图像增强后的靶标轨迹图像。

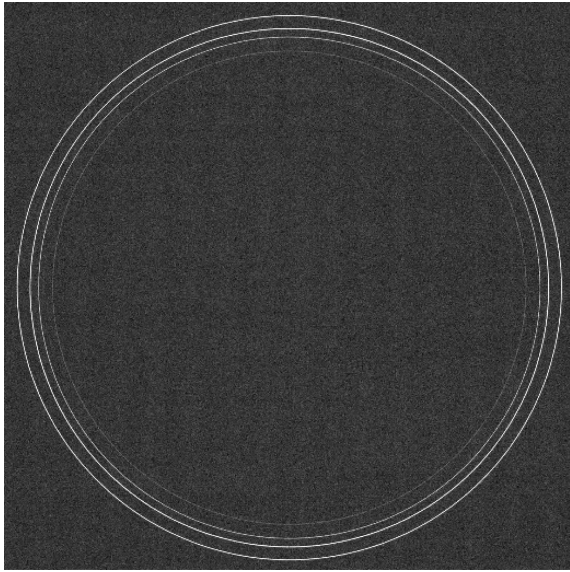


图 13 CCD 采集的靶标轨迹

Fig. 13 Target trajectory captured by CCD

基于获得的靶标轨迹(图 13),主轴径向回转误差分析主要包括以下步骤:

(1) 通过图像预处理技术提高靶标轨迹的信噪比。假设主轴的运转速度为 6 000 r/min,所使用的 CCD 像素为 10 μm ,靶标伴随主轴的回转线速度为 3 m/s,则单个像素的曝光时间约为 0.03 ms。因为曝光时间极短,导致 CCD 的输出响应极低。由于 CCD 自身的暗电流噪声和环境杂散光干扰,图像信噪比进一步降低。大量实验表明,本课题使用的装置在无靶标照明的情况下,由 CCD 暗电流噪声和杂散光影响导致的图像背景噪声灰度值约为 10~16。为了减小背景噪声的影响,我们将电平裁剪法应用于原始图像。然后,对图像进行全局线性变换,进一步增强图像的对比度。

(2) 轨迹分离。在设计硅基靶标片时,在距离圆心 5 mm 的圆周上均布了 4 个靶标孔,由于靶标片的圆心与主轴回转轴之间存在偏心,因此 CCD 采集到的靶标轨迹图像中会出现多个靶标轨迹,如图 13 所示。因此,需要提取出每个靶标孔的轨迹图像,并做后续处理。由于每个靶标孔的回转特性都与被测主轴保持一致,因此多个靶

标孔可以用来单独进行主轴径向回转误差评定。

(3) 靶标轨迹中心提取。对 4 条轨迹图像分别使用 Canny 算子进行边缘提取。经过 Canny 算子运算后,靶标轨迹的内外两侧的边缘如图所示。评价主轴径向回转误差需要使用靶标轨迹的中心信息。



图 14 Canny 算子边缘提取

Fig. 14 Image for Canny edge detection

(4) 评估亚像素靶标轨迹的圆度。参照 ISO/TS 12181-1:2007,基于最小二乘参考圆对靶标轨迹进行圆度评估。首先求取靶标轨迹的最小二乘参考圆。经上述步骤求取的靶标轨迹可由坐标集 P 表示。 $P=[x_i, y_i], i=1, 2, 3, \dots, n$ 。 n 为靶标轨迹上数据点的个数。根据最小二乘法原理,目标函数可描述为:

$$F(a, b, c) = \sum_{i=1}^n (x_i^2 + y_i^2 + ax_i + by_i + c)^2. \quad (1)$$

对 $F(a, b, c)$ 求偏导,令偏导等于零,获取极值点,得到:

$$\begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n x_i^3 + \sum_{i=1}^n x_i y_i^2 \\ \sum_{i=1}^n x_i^2 y_i + \sum_{i=1}^n y_i^3 \\ \sum_{i=1}^n x_i^2 + \sum_{i=1}^n y_i^2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n x_i^2 & \sum_{i=1}^n x_i y_i & \sum_{i=1}^n x_i \\ \sum_{i=1}^n x_i y_i & \sum_{i=1}^n y_i^2 & \sum_{i=1}^n y_i \\ \sum_{i=1}^n x_i & \sum_{i=1}^n y_i & n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (2)$$

求解上述方程可得 a, b, c 。进一步可知最小二乘参考圆的圆心 O 坐标为 (X_o, Y_o) , 半径为 R_o , 即有:

$$X_o = -0.5a,$$

$$Y_o = -0.5b,$$

$$R_o = 0.5 \times \sqrt{a^2 + b^2 - 4c}. \quad (3)$$

然后求取靶标轨迹上距离参考圆的最大和最小差值。 R_i 为数据集 P 中每一点到参考圆圆心 O 的距离, 如公式(4)所示:

$$R_i = \sqrt{(x_i - X_o)^2 + (y_i - Y_o)^2}. \quad (4)$$

R_i 与 R_o 的差值用来描述轨迹上的点与参考圆之间的距离, 并以此求取 E_{\max} 和 E_{\min} 。

$$E_i = R_i - R_o, \quad (5)$$

$$E_{\max} = \max(E_i), \quad (6)$$

$$E_{\min} = \min(E_i). \quad (7)$$

E_{round} 被用来描述最终的靶标轨迹圆度误差, 则有:

$$E_{\text{round}} = E_{\max} - E_{\min}. \quad (8)$$

4.2 测量误差分离

基于 4.1 所描述的靶标轨迹追踪法, 进一步分析了该方法对主轴回转过程中轴向回转误差运动和倾角回转误差运动对测量结果的影响。

4.2.1 轴向回转误差

测量装置装配时要求成像镜头的光轴与主轴的平均回转轴线重合, 靶标固定在主轴上。当主轴回转运动中仅仅包含轴向误差运动 $\Delta\delta$ 时, 靶标将形成如图 15 中的靶标轨迹, 红色虚线为靶标最大轴向跳动时所在的平面。由于成像系统与主轴回转轴线同轴安装, 因此 CCD 对靶标的轴向位移不敏感, 所获取的轨迹图像不包含任何轴向误差运动的信息。

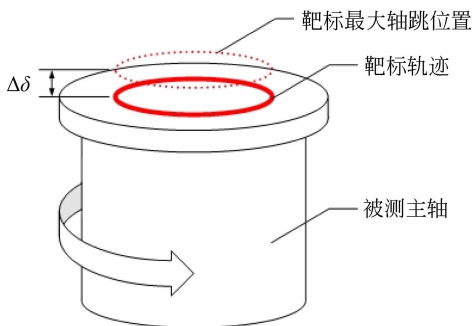


图 15 靶标轨迹追踪法中的轴向误差
Fig. 15 Axial error motion in TTT method

4.2.2 倾角回转误差

建立模型以区分径向误差运动和倾角误差运动。靶标轨迹追踪法中的径向误差运动模型及 CCD 记录的轨迹如图 16 所示。图中, $\Delta\mu$ 是以 LSCI 定义的径向回转误差, R_o 是靶标轨迹上距离最小二乘参考圆圆心最远的点到圆心的距离, R_i 是靶标轨迹上距离最小二乘参考圆圆心最近的点到圆心的距离, $\Delta\mu$ 是 R_o 与 R_i 的差值, 即靶标轨迹的圆度误差。

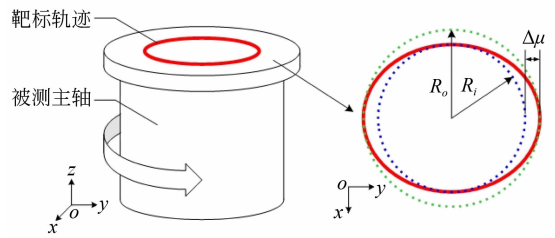


图 16 靶标轨迹追踪中的径向回转误差与它的轨迹
Fig. 16 Radial error motion in TTT method

然而, 当主轴仅以倾斜误差运动旋转时, CCD 所拍摄的轨迹如图 17 所示, 与图 16 中右图所示的轨迹相似。类似地, 建立了靶标轨迹追踪法中的倾角回转误差运动模型。在这种情况下, $\Delta\mu'$ 表示的不是径向回转误差, 而是倾角回转误差表现为径向误差的形式。因此, 需要对 $\Delta\mu'$ 与 $\Delta\theta$ 的数值关系进行分析。

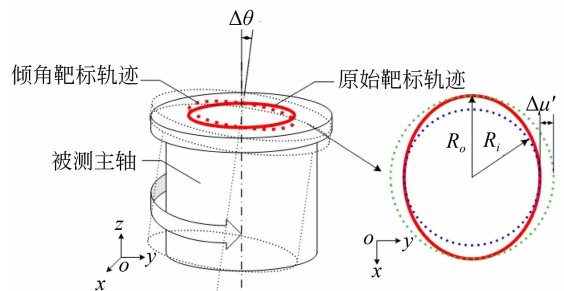


图 17 靶标轨迹追踪中的倾角回转误差与它的轨迹
Fig. 17 Tilt error motion in TTT method

为了描述 $\Delta\theta$ 和 $\Delta\mu'$ 之间的关系, 在图 18 中给出了另一个模型。图中, θ_M 和 θ_N 是主轴回转过程中, 旋转轴和主轴回转平均线之间的最小倾角和最大倾角。

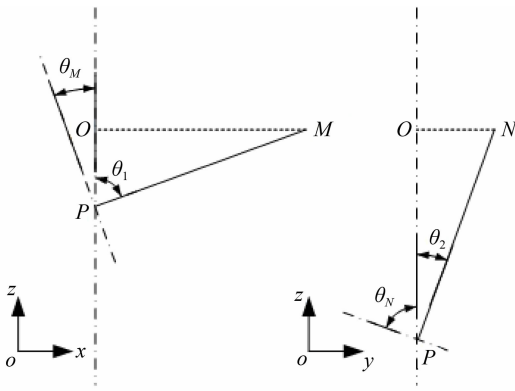


图 18 倾角回转误差的定义

Fig. 18 Model of tilt error motion

因此,倾角回转误差 $\Delta\theta$ 可以定义为:

$$\Delta\theta = \theta_N - \theta_M. \quad (9)$$

因为旋转面垂直于旋转轴, θ_M 和 θ_N 可表示为:

$$\begin{cases} \theta_M = 90^\circ - \theta_1 \\ \theta_N = 90^\circ - \theta_2 \end{cases} \quad (10)$$

因此,式(9)可以转换成:

$$\begin{cases} \Delta\theta = \theta_1 - \theta_2 \\ \theta_1 = \arcsin\left(\frac{MO}{MP}\right) \\ \theta_2 = \arcsin\left(\frac{NO}{NP}\right) \end{cases} \quad (11)$$

根据这些定义,当靶标位于位置 M 时,可以假设靶标轨迹中没有倾角回转误差。这意味着, $|MO| = |MP| = |NP|$, $\theta_M = 90^\circ$ 。 $\Delta\theta$ 仅由 θ_2 引起。所以, $\Delta\theta$ 可以表示为:

$$\Delta\theta = 90^\circ - \theta_2. \quad (12)$$

结合上述方程,可以得到 $\Delta\mu'$ 和 $\Delta\theta$ 之间的关系:

$$\Delta\mu' = MO - NO = MO \cdot (1 - \cos \Delta\theta). \quad (13)$$

假设主轴以 $5'$ 倾角误差回转,而 MO 是 5 mm,因此, $\Delta\mu'$ 仅仅为 5.29×10^{-6} mm (即 5.29 nm)。因此,可以忽略靶标轨迹追踪法中的倾角误差运动。靶标轨迹的圆度误差可以被认为是主轴的径向回转误差。

4.3 主轴动态回转误差测量实验

旋转轴是被测高速主轴的核心部件,由静压气浮支撑,实验过程中以 500 r/min 的步长实现 500 r/min 至 6 000 r/min 的速度。通过超精密装配技术实现机械约束,将主轴的最大径向偏移限

制在 $15 \mu\text{m}$ 以下。对于正常工作状态,主轴的径向回转误差将不大于 $15 \mu\text{m}$ 。实验中,将研制的标准器安装在被测主轴回转端面上。

测量设备如图 19 所示,测量基台由气浮底座支撑以减小外部振动对测量结果的影响。为了减小测量工作的计算成本,测量过程中使用 1 倍成像镜头实现 1:1 靶标轨迹成像。所用 CCD 相机为 JAI 公司的 BM 500GE,其分辨率为 $2\,456 \times 2\,058$,像元尺寸为 $3.45 \mu\text{m} \times 3.45 \mu\text{m}$,成像芯片可以完全记录靶标轨迹。相机的快门时间可以从 $20 \mu\text{s}$ 到 2 s 调整,当主轴转速为 6 000 r/min 时,可以调整快门时间至 10 ms 以记录主轴回转一周的轨迹。同时,为了实现对靶标轨迹的清晰图像,测量装置 z 方向设备要具有调节功能。相机的快门由外部触发器控制,严格地实现对主轴一次回转周期中的靶标轨迹获取。进一步地,由计算机来处理相机获得的靶标轨迹图像。

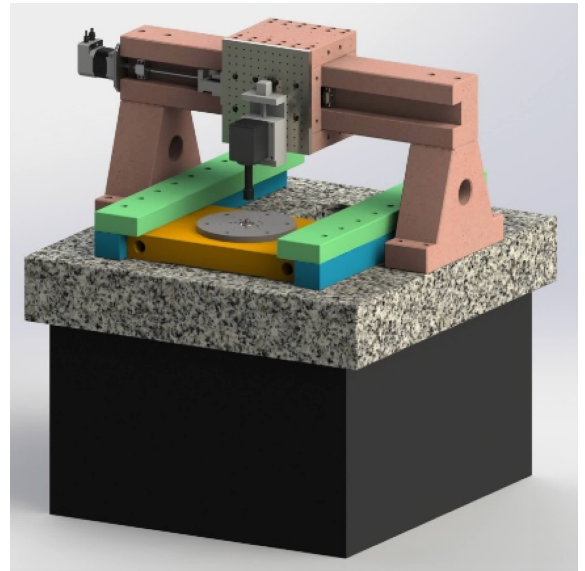


图 19 基于靶标轨迹追踪法的测量系统配置

Fig. 19 Measuring device for TTT method

在实验数据评价过程中,用类似李萨如图的形式来描述主轴径向回转误差。基圆的半径为 4 个单元,每个单元的尺寸与像素 ($3.45 \mu\text{m}$) 相同。这些曲线是由数据集 $[x_i, y_i]$ 表示的长轴的角位置。与传统的基于标准球和电容传感器的测量方法不同,靶标轨迹追踪法得到的曲线没有标准器安装偏心误差,因此误差曲线的中心与基圆圆心重合。如 4.2 节中分析所述,测量误差即是主轴

的径向回转误差。

为了评价靶标轨迹追踪法在高速下的测量稳定性,在高速主轴的工作速度为 6 000 r/min 时进行多组实验,结果如图 20 所示(彩图见期刊电子版)。根据 4.1 节中所述的主轴径向回转误差评定方法,绿色的内圆半径为 E_{min} ,红色的外圆半径为 E_{max} 。内外圆半径的差值表示 E_{round} ,分别为 1.33,1.34,1.34,1.34,1.32,1.40 pixel,最大偏差约为 0.08 pixel,即 4.59,4.62,4.62,4.62,4.55和 4.83 μm 。最大偏差约为 0.24 μm 。由此可见,靶标轨迹追踪方法具有良好的稳定性。

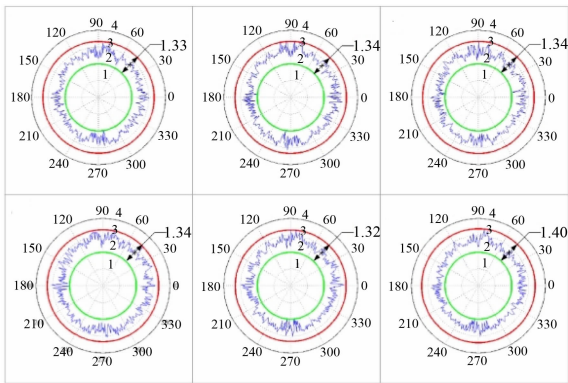


图 20 高速主轴 6 000 r/min 时的李萨如图
Fig. 20 Lissajous images of radial error motion at 6 000 r/min

与此同时,在其他转速下测得的径向误差如图 21 所示。与 6 000 r/min 时的测量方法相同,在每个转速下获取 15 幅靶标轨迹图像。由图可见,当主轴低速运行时,靶标轨迹追踪法具有极好的测量稳定性。随着转速的增加,测量数据的离散程度逐渐增大,但是波动幅度小于 0.2 pixel,即 0.69 μm 。若使用像元尺寸更小的 CCD,可以获得更高的测量精度。

通过上述分析可知,基于靶标轨迹追踪法通过评估靶标轨迹的圆度误差来测量高速主轴的动态径向误差,靶标轨迹的圆度误差等于主轴的径向回转误差。实验结果证实了所提出的靶标轨迹追踪法对 6 000 r/min 工作状态的主轴的动态径向回转误差测量的有效性。该方法结构简单、稳定可靠,可广泛应用于主轴动态径向误差测量领域。

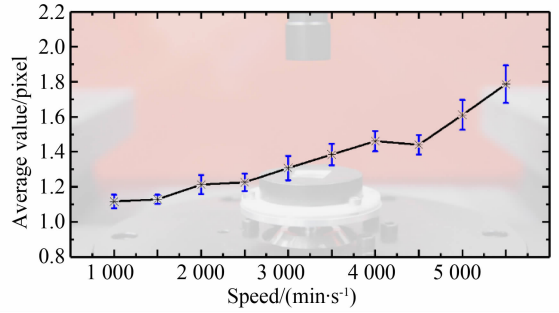


图 21 不同转速下的测量结果对比
Fig. 21 Radial error of high-speed spindle at different speeds

5 总结与展望

本文对主轴动态参数计量技术的研究进行了分类与分析,从主轴回转误差测量方法和主轴回转误差测量数据的处理及使用两个方面进行了综述,并进一步提出一种基于靶标轨迹追踪法的主轴动态回转误差测量方法。

总的来说,国内外的回转误差研究从大圆成夫的三点法出发,对主轴静态/低速回转误差进行测量,不断改善测量方法,完善误差数据分离手段,已经形成了相当完善的测量体系。但是标准器的自身精度和安装精度,以及位移传感器自身的响应频率限制了这类方法在主轴动态参数计量中的应用。依托于光电技术的发展,一部分学者开发出了基于光学手段的主轴动态参数测量技术,有效地提高了测量精度,扩展了被测主轴的可测转速范围。由于光学手段依托于超精密光学装配技术,因此对光学系统的改进亟待进行。本文在总结前人研究的基础上,将超精密测量理论、误差分离与补偿技术、现代光电测量技术、数字图像处理技术等多学科交叉融合,提出了一种基于靶标轨迹追踪法的主轴动态回转误差测量方法,并实现了在主轴以 6 000 r/min 转速运行时的径向回转误差测量。实验结果表明:该测量方法的测量精度在微米级;单一转速的动态测量稳定性优于 1 μm ,对各个转速的动态误差测量都具有可靠性,满足了高速主轴动态参数测量的要求。

参考文献:

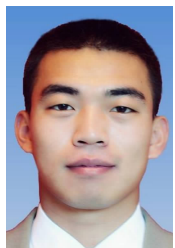
- [1] 陈循介. 德国建立世界上第二个机床工业、制造业、工业化强国的道路[J]. 精密制造与自动化, 2012(4): 1-2, 60.
CHEN X J. The way for Germany to establish the second powerful country of machine tool industry, manufacturing industry and industrialization in the world[J]. *Precise Manufacturing & Automation*, 2012(4): 1-2, 60. (in Chinese)
- [2] TLUSTY J. Dynamics of high-speed milling[J]. *Journal of Engineering for Industry*, 1986, 108(2): 59-67.
- [3] HIRAO M, TLUSGY J. Effect of negative shear on initial chipping[J]. *J Mech Eng Lab.*, 1987, 41(5): 215-226.
- [4] ALTINTAS Y, YELLOWLEY I, TLUSTY J. The detection of tool breakage in milling operations[J]. *Journal of Engineering for Industry*, 1988, 110(3): 271-277.
- [5] TLUSTY J, SMITH S. *NC Programming for Quality in Machining*[M]. Dearborn: Soc Manufacturing Engineers, 1990: 483-488.
- [6] BRYAN J B. Test gauge for machine tools having non-disengageable servo drives-has two gauge balls held and separated from each other by telescoping fixture and moving to indicate measurement error; US patent, US4435905-A[P]. [1984-03-13]
- [7] BRYAN JB. Workpiece e. g. metal, surface forming method, involves providing slow tool servo assembly with tool and spindle assembly, where tool assembly is oscillated to remove portions of workpiece for forming axially asymmetric portion: US patent, US2004003689-A1 [P]. [2004-01-18]. (2006-08-15).
- [8] 青木保雄, 大圆成夫. 3点法真円度測定法の展开[J]. 精密機械[日本], 1966, 32(12): 37-32.
AOKI Y, OHBA S. The third round method of roundness determination[J]. *Precision Machinery*, 1966, 32(12): 37-32. (in Japanese)
- [9] DONALDSON R R. A simple method for separating spindle error from test ball roundness error[J]. *Ann Cirp*, 1972, 21(1): 125-126.
- [10] NOGUCHI S, TSUKADA T, SAKAMOTO A. Evaluation method to determine radial accuracy of high-precision rotating spindle units[J]. *Precision Engineering*, 1995, 17(4): 266-273.
- [11] GAO W, KIYONO S, NOMURA T. A new multiprobe method of roundness measurements[J]. *Precision Engineering*, 1996, 19(1): 37-45.
- [12] GAO W, KIYONO S, SUGAWARA T. High-accuracy roundness measurement by a new error separation method[J]. *Precision Engineering*, 1997, 21(2/3): 123-133.
- [13] GREJDA R, MARSH E, VALLANCE R. Techniques for calibrating spindles with nanometer error motion[J]. *Precision Engineering*, 2005, 29(1): 113-123.
- [14] GAO W, TANO M, ARAKI T, *et al.*. Measurement and compensation of error motions of a diamond turning machine[J]. *Precision Engineering*, 2007, 31(3): 310-316.
- [15] 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.
- [16] LEE J, GAO W, SHIMIZU Y, *et al.*. Spindle error motion measurement of a large precision roll lathe[J]. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2012, 13(6): 861-867.
- [17] CAPPAS S, REYNAERTS D, AL-BENDER F. A sub-nanometre spindle error motion separation technique[J]. *Precision Engineering*, 2014, 38(3): 458-471.
- [18] 蔡鹤皋. 关于主轴回转运动精度及其动态测量方法的分析[J]. 哈尔滨工业大学学报, 1978, 10(2): 56-70.
CAI H G. Analysis of spindle rotation motion accuracy and its dynamic measurement method[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 1978, 10(2): 56-70. (in Chinese)
- [19] 钟先信. 高精度主轴回转精度的测量[J]. 计量技术, 1982(5): 5-11.
ZHONG X X. Measurement of high precision spindle rotation accuracy[J]. *Measurement Technique*, 1982(5): 5-11. (in Chinese)
- [20] 洪迈生. 应用误差分离技术同时测量和分离机床主轴的径向误差运动和工件的形状误差[J]. 振动. 测试与诊断, 1983, 3(Z1): 1-10.
HONG M SH. Applying error separation technique to simultaneously measure and separate the radial error motion of machine tool spindle and the shape error of workpiece[J]. *Journal of Vibra-*

- tion, *Measurement & Diagnosis*, 1983, 3(Z1): 1-10. (in Chinese)
- [21] 叶宗生, 顾启泰, 章燕申. 论多步法误差分离技术的测量精度[J]. 计量学报, 1990(2): 119-123.
YE J SH, GU Q T, ZHANG Y SH. Measuring accuracy of errors separation technique by using multistep method[J]. *Acta Metrologica Sinica*, 1990(2): 119-123. (in Chinese)
- [22] 王晓慧, 李占魁, 袁哲俊. 圆度、圆柱度在线测量及补偿控制实验研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 1995, 27(1): 114-117.
WANG X H, LI ZH K, YUAN ZH J. The experimental study of on-line measurement and compensatory control for the roundness and cylindricity [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 1995, 27(1): 114-117. (in Chinese)
- [23] 洪迈生, 邓宗煌. 圆度和回转运动误差的时域二点法分离技术[J]. 中国机械工程, 1997, 8(2): 88-89, 92.
HONG M SH, DENG Z H. A time domain two point method for in situ measurement and separation of roundness and rotating error motion[J]. *China Mechanical Engineering*, 1997, 8(2): 88-89, 92. (in Chinese)
- [24] 阚光萍. 超精密空气主轴回转精度的测量与数据处理[J]. 航空精密制造技术, 1999, 35(3): 5-7.
KAN G P. Rotation accuracy measurement for super-precision air spindles and its data processing [J]. *Aviation Precision Manufacturing Technology*, 1999, 35(3): 5-7. (in Chinese)
- [25] 陈海斌, 程雪梅, 钟先信. 空气静压轴承主轴回转精度的检测[J]. 重庆大学学报: 自然科学版, 2000, 23(1): 49-52.
CHEN H B, CHENG X M, ZHONG X X. Test of aerostatic bearings spindle rotary precision[J]. *Journal of Chongqing University: Natural Science Edition*, 2000, 23(1): 49-52. (in Chinese)
- [26] 洪迈生, 邓宗煌, 陈健强, 等. 精确的时域三点法圆度误差分离技术[J]. 上海交通大学学报, 2000, 34(10): 1317-1319.
HONG M SH, DENG Z H, CHEN J Q, *et al.*. Accurate time domain three point method for error separation of roundness[J]. *Journal of Shanghai Jiao Tong University*, 2000, 34(10): 1317-1319. (in Chinese)
- [27] 谭久彬, 赵维谦, 杨文国. 改善多步法谐波抑制的新方法: 鉴相法[J]. 中国机械工程, 2001, 12(S1): 161-162.
TAN J B, ZHAO W Q, YANG W G. A new error separation method: phase-distinguish method to improve multi-step error separation method[J]. *China Mechanical Engineering*, 2001, 12(S1): 161-162. (in Chinese)
- [28] 黄长征, 李圣怡. 超精密车床主轴回转精度动态测试仿真[J]. 计算机仿真, 2002, 19(6): 96-99.
HUANG CH ZH, LI SH Y. The simulation on dynamic measurement of spindle error motions of ultra-precision lathe [J]. *Computer Simulation*, 2002, 19(6): 96-99. (in Chinese)
- [29] 黄长征, 李圣怡. 超精密车床主轴回转误差运动的动态测试[J]. 航空精密制造技术, 2002, 38(4): 1-3.
HUANG CH ZH, LI SH Y. Dynamic measurement of spindle error motion of ultraprecision lathe [J]. *Aviation Precision Manufacturing Technology*, 2002, 38(4): 1-3. (in Chinese)
- [30] 苏恒, 洪迈生, 魏元雷, 等. 机床主轴径向误差运动在线检测与信号处理[J]. 机械工程学报, 2002, 38(6): 56-60.
SU H, HONG M SH, WEI Y L, *et al.*. Cnc machine spindle radial motion error on-line test and signal processing[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2002, 38(6): 56-60. (in Chinese)
- [31] 苏恒, 洪迈生, 李自军, 等. 机床主轴运动误差的在线高精度测量[J]. 制造技术与机床, 2003(3): 47-49.
SU H, HONG M SH, LI Z J, *et al.*. On-line high-precision measurement for motion error in machine spindle [J]. *Manufacturing Technology & Machine Tool*, 2003(3): 47-49. (in Chinese)
- [32] 梁淑卿, 孙宝玉, 韩连英, 等. 主轴回转精度动态测试[J]. 长春工业大学学报: 自然科学版, 2004, 25(2): 21-23.
LIANG SH Q, SUN B Y, HAN L Y, *et al.*. Research on the dynamic measurement for the rotation accuracy of a spindle [J]. *Journal of Changchun University of Technology: Natural Science Edition*, 2004, 25(2): 21-23. (in Chinese)
- [33] ASHOK S D, SAMUEL G L. Modeling, measurement, and evaluation of spindle radial errors in a miniaturized machine tool [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2012, 59(5/6/7/8): 445-461.

- [34] JIN L, YAN Z Y, XIE L M, *et al.*. An experimental investigation of spindle rotary error on high-speed machining center[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2014, 70(1/2/3/4): 327-334.
- [35] PENG H H, WU Y J, WANG B, *et al.*. An improved two-point real-time measuring method for radial micro-displacement measurement on high-speed smart boring bar [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2015, 81(5/6/7/8): 925-933.
- [36] CHEN Y, ZHAO X S, GAO W G, *et al.*. A novel multi-probe method for separating spindle radial error from artifact roundness error[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017, 93(1/2/3/4): 623-634.
- [37] LIU C, JYWE W, LEE H. Development of a simple test device for spindle error measurement using a position sensitive detector[J]. *Measurement Science and Technology*, 2004, 15(9): 1733-1741.
- [38] FUJIMAKI K, MITSUI K. Radial error measuring device based on auto-collimation for miniature ultra-high-speed spindles[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2007, 47(11): 1677-1685.
- [39] CASTRO H F F. A method for evaluating spindle rotation errors of machine tools using a laser interferometer[J]. *Measurement*, 2008, 41(5): 526-537.
- [40] MURAKAMI H, KAWAGOISHI N, KONDO E, *et al.*. Optical technique to measure five-degree-of-freedom error motions for a high-speed microspindle[J]. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2010, 11(6): 845-850.
- [41] 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.
- [42] ANANDAN K P, OZDOGANLAR O B. An LDV-based methodology for measuring axial and radial error motions when using miniature ultra-high-speed (UHS) micromachining spindles[J]. *Precision Engineering*, 2013, 37(1): 172-186.
- [43] ANANDAN K P, OZDOGANLAR O B. Analysis of error motions of ultra-high-speed (UHS) micromachining spindles[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2013, 70: 1-14.
- [44] ANANDAN K P, OZDOGANLAR O B. A multi-orientation error separation technique for spindle metrology of miniature ultra-high-speed spindles [J]. *Precision Engineering*, 2016, 43: 119-131.
- [45] GARINEI A, MARSILI R. Design of an optical measurement system for dynamic testing of electrospindles [J]. *Measurement*, 2013, 46(5): 1715-1721.
- [46] KAVITHA C, ASHOK S D. A new approach to spindle radial error evaluation using a machine vision system[J]. *Metrology and Measurement Systems*, 2017, 24(1): 201-219.
- [47] 姜志峰, 郝秀朋, 刘力, 等. 圆光栅配合自准直仪测量主轴径向运动误差[J]. *光学精密工程*, 2019, 27(9): 2053-2061.
- LOU ZH F, HAO X P, LIU L, *et al.*. Spindle radial motion error measurement using a circular grating and a autocollimator[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2019, 27(9): 2053-2061. (in Chinese)
- [48] TU J F, BOSSMANN S B, HUNG S C C. Modeling and error analysis for assessing spindle radial error motions[J]. *Precision Engineering*, 1997, 21(2/3): 90-101.
- [49] 何钦象, 张华容, 杨静. 高速电磁主轴回转精度的分析[J]. *机械科学与技术*, 1999, 18(4): 3-5.
- HE Q X, ZHANG H R, YANG J. Analysis of the precision gyration of the spindle supporting magnetic bearings [J]. *Mechanical Science and Technology*, 1999, 18(4): 3-5. (in Chinese)
- [50] 洪迈生, 魏元雷, 李济顺. 一维和多维误差分离技术的统一理论[J]. *中国机械工程*, 2000, 11(3): 245-248.
- HONG M SH, WEI Y L, LI J SH. Unified theory of one-dimension and multi-dimension error separation techniques [J]. *China Mechanical Engineering*, 2000, 11(3): 245-248. (in Chinese)
- [51] 洪迈生, 蔡萍. 多步法误差分离技术的比较分析 [J]. *上海交通大学学报*, 2004, 38(6): 877-881.
- HONG M SH, CAI P. Analysis and comparison of multi-step error separation technique[J]. *Journal of Shanghai Jiao Tong University*, 2004, 38(6): 877-881. (in Chinese)
- [52] MARSH E, COUEY J, VALLANCE R. Nanometer-level comparison of three spindle error motion separation techniques [J]. *Journal of Manufac-*

- turing Science and Engineering*, 2006, 128(1): 180-187.
- [53] 陈清, 梁兵. 主轴径向回转误差测试中的误差分析[J]. 湖南大学学报:自然科学版, 2003, 30(4): 23-25, 32.
CHEN Q, LIANG B. Error analysis of test errors in radial rotation error of spindle[J]. *Journal of Hunan University: Natural Sciences*, 2003, 30(4): 23-25, 32. (in Chinese)
- [54] 彭万欢, 赵午云, 陶继忠, 等. 超精密空气静压主轴径向回转误差的测试研究[J]. 制造技术与机床, 2008(10): 55-58.
PENG W H, ZHAO W Y, TAO J ZH, *et al.*. Study on rotational error measurement of ultra-precision aerostatic spindle [J]. *Manufacturing Technology & Machine Tool*, 2008(10): 55-58. (in Chinese)
- [55] 徐秀玲, 姜军, 王红亮. 机床主轴回转误差测试系统的研究[J]. 制造技术与机床, 2008(10): 136-139, 154.
XU X L, JIANG J, WANG H L. Spindle rotation error measuring system[J]. *Manufacturing Technology & Machine Tool*, 2008(10): 136-139, 154. (in Chinese)
- [56] LU X D, JAMALIAN A. A new method for characterizing axis of rotation radial error motion: Part 1. Two-dimensional radial error motion theory[J]. *Precision Engineering*, 2011, 35(1): 73-94.
- [57] LU X, JAMALIAN A, GRAETZ R. A new method for characterizing axis of rotation radial error motion: Part 2. Experimental results[J]. *Precision Engineering-journal of the International Societies for Precision Engineering and Nanotechnology*, 2011, 35(1): 95-107.
- [58] SHU Q, ZHU M Z, LIU X B, *et al.*. Radial error motion measurement of ultraprecision axes of rotation with nanometer level precision[J]. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2017, 139(7): 071017.
- [59] 刘启伟. 主轴动态回转误差测试及分析[J]. CAD/CAM与制造业信息化, 2013(2): 80-84.
LIU Q W. Measurement and analysis of spindle dynamic rotation error[J]. *Cad/Cam Yu Zhizaoye Xinxihua*, 2013(2): 80-84. (in Chinese)
- [60] HUANG P, LEE W B, CHAN C Y. Investigation of the effects of spindle unbalance induced error motion on machining accuracy in ultra-precision diamond turning[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2015, 94: 48-56.
- [61] HUANG P, LEE W B, CHAN C Y. Investigation on the position drift of the axis average line of the aerostatic bearing spindle in ultra-precision diamond turning[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2016, 108: 44-51.

作者简介:



金岸(1991—),男,江苏淮安人,博士研究生,2014年、2016年于哈尔滨工业大学分别获得学士、硕士学位,主要从事计量校准仪器设计、高精度测量技术的研究。E-mail:ja_2010@163.com

通讯作者:



金鹏(1972—),男,黑龙江哈尔滨人,博士,教授,博士生导师,2001年于哈尔滨工业大学获得博士学位,主要从事基于微纳器件制备及其应用方面的研究。E-mail:p.jin@hit.edu.cn