

转轴激光多自由度运动误差测量综述

杨婧 冯其波 李家琨

北京交通大学理学院光电检测技术研究所, 北京 100044

摘要 转轴为旋转运动提供了基准,是精密测量、加工、控制等设备的重要运动部件之一,在高端加工制造、航空航天、光学分析等领域具有重要地位。转轴在转动时具有六自由度几何运动误差,通过对六自由度误差的测量,建立误差补偿模型进行误差补偿,是目前世界上普遍采用的用于提高精密测量、加工、控制等设备精度的主要途径之一。综述了现有转轴激光多自由度误差测量方法,并分析了各种方法的优缺点,讨论了其发展趋势。

关键词 测量; 转轴; 多自由度运动误差; 转角定位误差

中图分类号 TH741 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP53.090003

Review on Multi-Degree-of-Freedom Motion Error Measurement Methods for Rotary-Axis Laser

Yang Jing Feng Qibo Li Jiakun

*Institute of Optoelectronic Measurement and Control Technology, School of Science,
Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China*

Abstract Rotary axis is considered as the basis for rotational motion. It is a key component in precision measuring, machining and controlling equipments, and it plays a crucial role in high-end manufacturing, aerospace, and optical analysis fields. Each rotary axis has six degree-of-freedom translational and rotational errors. To improve the equipment accuracy, one of the commonly applied solutions is to measure the six degree-of-freedom errors and then to establish the error compensation model to compensate these errors. The progress in methods to measure the multi-degree-of-freedom motion errors in a rotary axis based on laser is reviewed, the principle, pros and cons of these methods are analyzed, and the trend in the field is discussed as well.

Key words measurement; rotary axis; multi-degree-of-freedom motion error; angular positioning error

OCIS codes 120.1880; 120.4630; 120.4820; 140.3460

1 引言

转轴是旋转运动的基础,是加工、测量、控制等设备的重要运动部件。多轴数控机床与加工中心等加工设备的加工精度^[1],圆度仪、三维激光扫描仪与激光跟踪仪等测量设备的测量精度^[2-3],多自由度(DOF)机械臂和雷达、卫星系统的天线座等精密控制系统的控制精度^[4-9],以及 X 射线衍射分析仪(XRD)、光栅光谱仪等分析仪器的分析结果^[10],都受到转轴运动姿态或运动误差的影响。随着各种仪器装备向高精度、高性能方向发展,对转轴旋转运动的精度要求不断提高。精确测量转轴各项运动误差,分析误差相互作用机理、确定主要误差源,在设计与制造环节通过优化设计、改进工艺提高转轴运动精度,在运行与维护环节通过误差补偿维持转轴运动精度,以提高并保障装备与仪器的性能^[11-13]。

转轴与直线轴在运动时都存在六自由度几何运动误差^[14],简称 6D 误差,包括转角定位误差 $\epsilon_z(\theta)$,绕 X 和 Y 两个坐标轴旋转的角度误差 $\epsilon_x(\theta)$ 和 $\epsilon_y(\theta)$,以及沿 X、Y、Z 三个坐标轴平移的直线度误差 $\delta_x(\theta)$ 、 $\delta_y(\theta)$ 、 $\delta_z(\theta)$,其中 θ 为转轴旋转的角度。由于直线运动比转动容易分析,对直线轴多自由度误差测量的研

收稿日期: 2016-04-11; 收到修改稿日期: 2016-05-19; 网络出版日期: 2016-08-24

基金项目: 基本科研业务费(2015JBM092)

作者简介: 杨婧(1985—),女,博士,工程师,主要从事光电检测等方面的研究。E-mail: yj0126@139.com

究相对成熟,已经出现了多种多自由度甚至六自由度误差同时测量的方法与仪器^[15-17],而对转轴多自由度误差测量的研究起步较晚,目前处于准确测量各个自由度误差与多自由度误差同时测量同步发展的阶段,还没有很好的转轴多自由度运动误差同时测量仪器,限制了相关设备性能的提升。因此多自由度误差同时测量成为众多转轴应用领域发展的必然需求,同时也是这些领域普遍存在但未能解决的问题。

转轴的转角定位精度是衡量旋转机械系统工作性能最重要的指标之一,因此转角定位误差是转轴 6D 误差中最为重要的一项,本文概述了转轴定位误差测量方法及多自由度误差测量方法,分析了各种方法的优缺点,并讨论了测量方法的发展趋势。

2 转角定位误差测量

2.1 自准直法

1998 年, Suh 等^[18]提出了一种基于自准直与多面棱镜的转轴转角定位误差测量方法,该方法已被 ISO230-1^[14]推荐为标准的转角定位误差测量方法之一,其测量原理如图 1 所示。将一个多面棱镜安装于被测转轴上,使得自准直装置的光轴与多棱镜的一个反射面垂直;测量时,被测转轴旋转的角度增量为多棱镜相邻两面的夹角补角的整数倍,通过自准直装置观测反射光线位置的变化来测量转角定位误差。该方法的测量精度受多面棱镜制造精度、安装精度以及自准直仪的测量精度等因素的限制,根据被测角度的精度要求,选择不同的仪器,其测量精度范围为 $0.01'' \sim 10''$ 。但该方法可测量角度误差范围较小,且只能测量特定角度的定位误差,如十二面体只能测量转角为 30° 或 30° 整数倍时的误差,目前虽然有七十二面体可以测量更多的转角,但是造价昂贵。因此该方法仅适用于无需连续测量的情况,可用于转轴回转误差的初步测量。

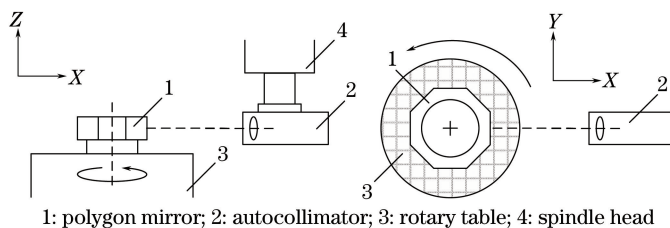


图 1 基于自准直与多面棱镜的转角定位误差测量方法示意图

Fig. 1 Diagram of angular positioning error measurement based on autocollimator and polygon mirror

2.2 干涉法

迈克耳孙干涉是最为典型的激光干涉光路,通过测量干涉条纹的变化,可得到靶镜的移动距离。利用激光干涉进行角度测量时,需要通过不同的光学器件将角度量转换为长度量进行测量。

2.2.1 基于双角锥棱镜的转角定位误差测量

1993 年至 1999 年间,英国雷尼绍公司 Chaney 等^[19]、美国惠普公司 Dowdy 等^[20]、东京精密公司 Ohsawa 等^[21]相继提出基于双角锥棱镜的激光干涉转角定位误差测量方法,该方法也被 ISO230-1^[14]推荐为标准的转角定位误差测量方法之一,其测量原理如图 2 所示。一束光经过角度干涉单元分成两束光,分别经角锥棱镜组 RR1 和 RR2 反射后回到角度干涉单元,最终由探测器接收,通过测量干涉条纹变化可以计算得

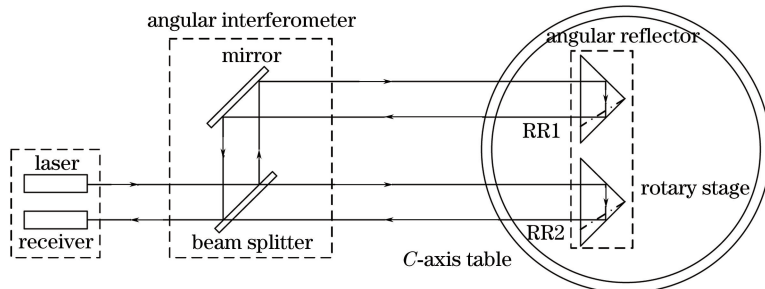


图 2 基于双角锥棱镜的转角定位误差测量原理

Fig. 2 Diagram of angular positioning error measurement based on double corner cubes

到转角定位误差。双频激光器诞生后,外差干涉法提高了干涉测量的精度,将图 2 中的激光器换为双频激光器、分光镜(BS)换为偏振分光镜后,可通过最终回到探测器的两束光的多普勒频移计算得到转角定位误差。该方法的典型装置为 Renishaw 公司生产的 XR20-W 无线型回转轴校准装置配合 XL-80 激光干涉仪构成的测量系统,在 $\pm 20''$ 范围内的测量精度为 $\pm 1''$ 。通过参考转台的反向旋转,可以实现 $0^\circ \sim 360^\circ$ 范围内的连续测量。由于干涉测量需要持续记录干涉条纹,在测量过程中必须采取有效措施防止光线中断,所以该方法对测量环境要求较高,适用于单个精密转轴的实验室测量,不适用于转轴批量生产、加工与使用过程中的测量。

2.2.2 基于 Kretschmann 结构的转角定位误差测量

2006 年, Wang 等^[22]提出一种基于 Kretschmann 结构的转角定位误差测量方法,其测量原理如图 3 所示。由塞曼激光器发出的双频激光经分光镜被分为两束光,分别入射到两个 Kretschmann 结构上,发生表面等离子共振现象,被测转轴旋转时由于入射角的变化导致 Kretschmann 结构反射率发生变化,通过测量两束反射光光强的变化即可计算出转动角度。为提高测量精度,通过测量反射光的相位变化来计算转动角度。该方法的理论分辨率为 $1.2 \times 10^{-7}^\circ$,实际分辨率为 $2.4 \times 10^{-7}^\circ$,测量范围为 $\pm 0.15^\circ$ 。可以看出,该方法测量精度高,但测量范围小,且被测转轴需要接出两根信号线与锁相放大器连接,目前仅适用于超精密转轴的实验室测量,不适用于转轴批量生产、加工、使用中的测量。

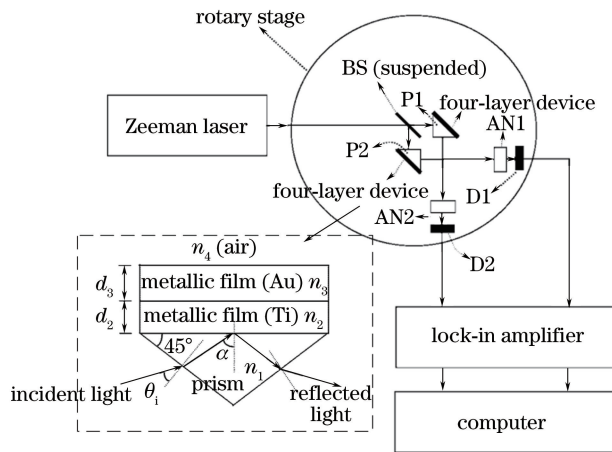


图 3 基于 Kretschmann 结构的转角定位误差测量原理

Fig. 3 Diagram of angular positioning error measurement based on Kretschmann's configuration

2.2.3 基于双折射晶体的转角定位误差测量

2009 年, Lin 等^[23]提出基于正方棱镜的外差干涉角度测量方法,其测量原理如图 4 所示。双频激光通过沃拉斯顿棱镜(WP)和双楔棱镜(TWP)后,被分为相互平行的两束光,两束光依次经过正方棱镜(SP)折射、反射镜 M 反射、SP 折射后,依然相互平行,最终回到探测器 D_m 上,当 SP 旋转时导致回到 D_m 上的光的光程差增加,对比探测器 D_r 与 D_m 上的光强 I_r 与 I_m 可以计算得到 SP 的旋转角度。将 SP 置于转轴上即可测量转角定位误差。该方法的测量精度随着测量角度范围的增大而降低,当被测角改变 $\pm 1.5^\circ$ 时测量精度为 $1''$,当被测角改变 $\pm 7^\circ$ 时测量精度降低至 $131''$,因此该方法较适用于高精度、小角度的转动角度测量。

2016 年, Hsieh 等^[24]提出另一种利用双折射晶体测量转角定位误差的方法,装置如图 5 所示。通过电光调制器(EOM)的双频激光被分光镜分光后,一束光由探测器 D_r 接收形成参考信号,另一束光通过角度敏感单元(AS)后与参考信号发生干涉,由于入射角不同,两束光将产生不同的光程差,从而使探测器 D_r 接收的测量信号产生一定的相位差,根据锁相放大器(LIA)测得的参考信号与测量信号的相位差,即可得到 AS 旋转的角度。AS 由一个双折射晶体和两个正三角棱镜组成,双折射晶体的两个折射率十分接近,双频激光经过该双折射晶体后传播方向基本保持一致,两个正三角棱镜可以增加测量范围、提高测量分辨率。经实验验证,该方法的角测量范围与分辨率分别为 26° 和 $0.72''$,比较适用于高精度、较大范围的转轴转动角度的测量。

可以看出,两种基于双折射原理的测量方法都需要在转轴两侧设置光路,增加了安装调试难度,该方法仅适用于微型转轴的测量。除以上几种方法以外,还可以通过聚焦激光束自混合干涉方法测量转轴转角定

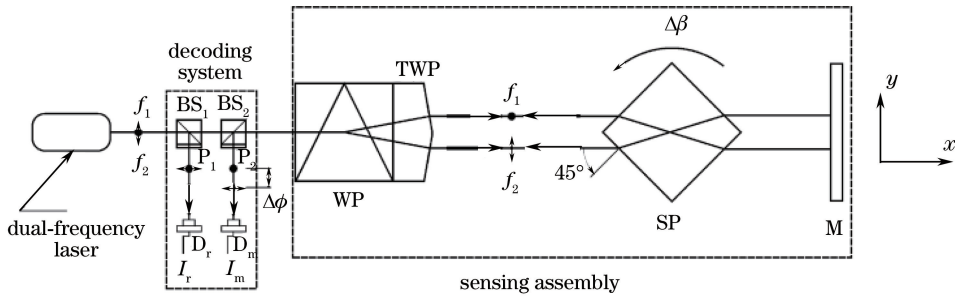


图4 基于正方棱镜的转角定位误差测量原理

Fig. 4 Diagram of angular positioning error measurement based on square prism

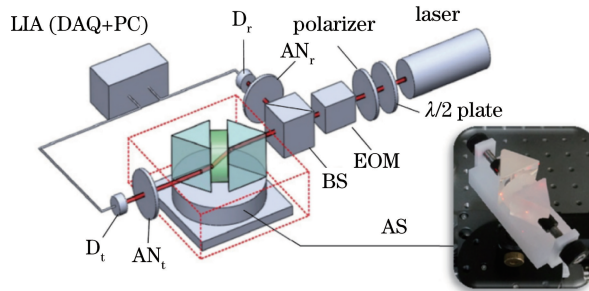


图5 基于双折射晶体的转角定位误差测量原理

Fig. 5 Schematic of angular positioning error measurement based on birefringent crystal

位误差^[25],但该方法目前仍处在理论阶段,未给出具体的理论精度与实验精度。

2.3 衍射法

Liu等^[26]于2004年提出利用光栅衍射测量转轴转角定位误差的方法,测量原理如图6所示。测量时根据反射光栅±1级衍射光在二维位置传感器(PSD)上位置的改变计算得到转角定位误差。实验证明其测量分辨率可以达到 $0.2''$,最大测角误差范围为 $\pm 1^\circ$ 。该方法结构简单、成本较低,测量精度高,可实现 $0^\circ \sim 360^\circ$ 范围以内的连续角度定位误差测量。但二维PSD测得的光点位置变化包含 $\delta_x(\theta)$ 、 $\epsilon_z(\theta)$ 、 $\epsilon_x(\theta)$ 、 $\epsilon_y(\theta)$ 4个误差,需要进行误差分离后才能得到精确的转角定位误差 $\epsilon_z(\theta)$ 。该方法比较适用于微小转轴的转角定位误差测量。

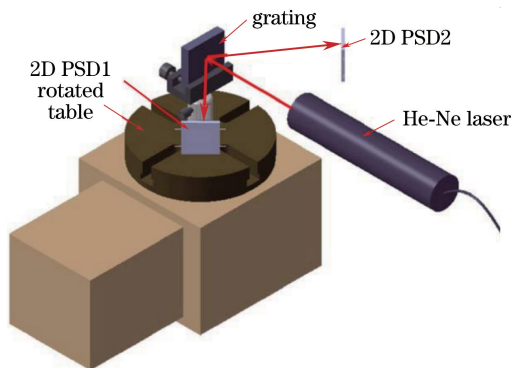


图6 基于反射光栅的转角定位误差测量方法

Fig. 6 Diagram of angular positioning error measurement method based on reflective diffraction grating

3 多自由度误差测量

在精确测量转角定位误差的基础上,通过增加光源、敏感元件、探测器以及分光元件等方法,可实现转轴多自由度误差测量,目前国内外提出的测量方法主要有准直法^[27-28]、干涉法^[29-31]、衍射法^[32-34]、激光跟踪法^[15,35-44]等,各种方法测量的维度与精度以及优缺点如表1所示。

表1 各种多自由度误差测量方法比较

Table 1 Comparison of various multi-DOF error measurement methods

Method	Accuracy of displacement			Accuracy of rotation			Pros	Cons
	error / μm			error / ($''$)				
	δ_x	δ_y	δ_z	ϵ_x	ϵ_y	ϵ_z		
Collimator	0.5	0.5	0.5	0.4	0.4	0.4	High efficiency, low cost	Short measurement range, error crosstalk, complex structure
Laser interferometry	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	0.2	High precision, direct measurement	Low efficiency
Grating diffraction	1.2	-	-	2.0	2.0	1.5	Low cost	error crosstalk, complex structure
Laser tracker	3.0	3.3	22.0	2.5	1.5	1.3	convenient installation	Low precision, error crosstalk

3.1 准直法

由于激光具有良好的空间稳定性与方向性,可以将激光器出射的激光作为准直基准线,当出射光经过一系列反射、透射、分光等变化后,最终被探测器接收,根据探测器上各光点位置的变化,可以分析计算得到待测量误差。

3.1.1 基于锥形多棱镜的6D误差同时测量

Chen 等^[27]在自准直法测量转角定位误差的基础上,提出一种由一个锥形六棱镜、三个半导体激光器以及三个二维 PSD 组成的转轴 6D 误差同时测量系统,如图 7 所示。当锥形六棱镜位置发生改变时,三个二维 PSD 上接收的光点位置随之发生改变。根据半导体激光器与二维 PSD 之间的位置关系、入射光和反射光与锥形六棱镜之间的关系,通过光线追迹可计算得出 6D 误差。以角锥棱镜(相当于锥形三棱镜)作为敏感器件进行实验,结果为:直线度误差测量范围 $\pm 3.5 \text{ mm}$,精度 $0.5 \mu\text{m}$,理论分辨率 $0.106 \mu\text{m}$,5 min 内稳定性 $\pm 1 \mu\text{m}$;角度误差测量范围 $\pm 2.5^\circ$,精度 $0.4''$,理论分辨率 $0.274''$,5 min 内稳定性 $\pm 1.5''$ 。

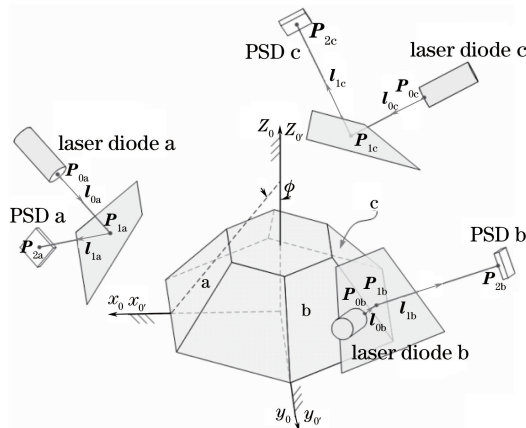


图7 基于锥形六棱镜的6D误差同时测量方法

Fig. 7 6D error measurement method based on 6-sided pyramid-polygon-mirror

该方法的测量精度高、速度快,但在某些特定情况下只能测量五自由度误差;与自准直测量方法类似,该方法测量范围不连续,例如锥形三棱镜只能测量 $0^\circ, 120^\circ, 240^\circ$ 这三个点附近的 6D 误差,要增加测量范围必须增加锥形多棱镜的面数,而锥形多棱镜的加工难度以及价格都会随其面数的增加而增加,故难以实现 $0^\circ \sim 360^\circ$ 内的连续测量;激光源与探测器数量较多,增加了测量系统的体积以及系统的安装调试难度;锥形多面体反射面的面型误差以及激光源与探测器的安装误差都会引入系统误差。由于这些限制因素,该方法

仅适用于微小旋转轴的 6D 误差测量,对于大型的加工中心并不合适。

3.1.2 基于 PSD 和半导体激光的 6D 测量

Park 等^[28]于 2009 年提出一种基于 PSD 和半导体激光器的转台 6D 误差测量方法以及相应测量系统,原理如图 8 所示。该方法分为两个步骤:1) BS1 的透射光被反射镜反射后,斜入射到 PSD1 上;2) BS1 的反射光被 BS2 分光后分别入射到 PSD1 和 PSD2 上。根据两个 PSD 上不同时刻光点的位置可计算得到 6D 误差。该方法结构简单,通过一次安装、两个步骤即可测量得出转轴的 6D 误差,较大幅度地提高了测量效率;但是该方法在实际应用中安装与调试较为困难,因此目前仍处在理论层面,未进行实验验证。

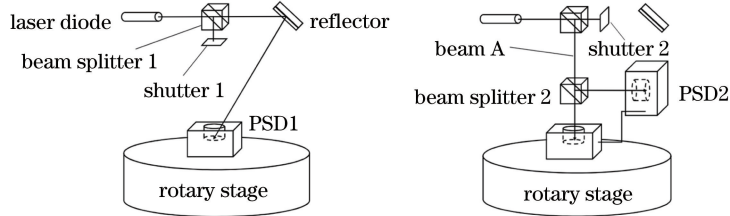


图 8 基于 PSD 和半导体激光器的 6D 误差测量系统。(a) 第一步;(b) 第二步

Fig. 8 6D error measurement system based on PSD and laser diode. (a) 1st step; (b) 2nd step

3.2 干涉法

3.2.1 传统的基于激光干涉的 6D 误差分时测量

激光干涉具有很高的灵敏度与精度,且可以测量长度、角度、振动等物理量,已被广泛运用于各种领域的测量。将激光干涉用于 6D 误差测量时,需配以不同的光学镜组,通过多次安装测量,分别实现各个自由度误差的测量,如图 3 和图 9 所示^[29-30]。该方法测量效率较低,比较适用于单台超精密转轴的高精度测量,不适用于转轴批量生产、加工、使用中的测量。

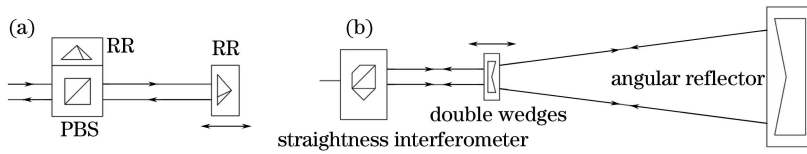


图 9 基于激光干涉的多自由度误差测量方法。(a) 位移测量;(b) 直线度测量

Fig. 9 Multi-DOF error measurement method based on interferometer. (a) Distance measurement; (b) straightness measurement

3.2.2 基于双路干涉的 6D 误差分时测量

为提高测量效率,He 等^[31]提出一种基于双路干涉的转轴 6D 误差测量方法,其原理如图 10 所示,该方法分为 5 个步骤:1) 根据位于 XOZ 平面内的两个激光干涉仪与对应角锥棱镜之间的距离,以及双光束与 Z

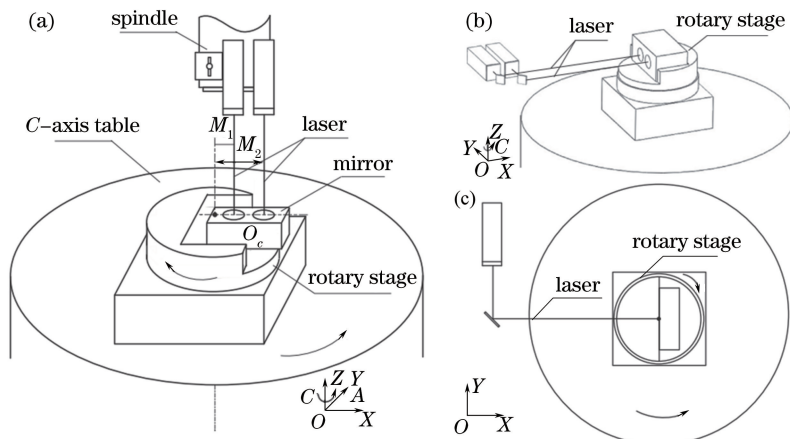


图 10 基于两个激光干涉仪的 6D 误差测量方法。(a) $\epsilon_y(\theta)$ 和 $\delta_z(\theta)$; (b) $\epsilon_z(\theta)$; (c) $\delta_x(\theta)$

Fig. 10 6D error measurement method based on two interferometers. (a) $\epsilon_y(\theta)$ and $\delta_z(\theta)$; (b) $\epsilon_z(\theta)$; (c) $\delta_x(\theta)$

轴的距离可计算得出 C 转轴绕 Y 轴的转动误差 $\epsilon_y(\theta)$ 和沿 Z 轴的径向跳动 $\delta_z(\theta)$, 如图 10(a) 所示; 2) 旋转主轴与参考转台, 使得两束出射光位于 YOZ 平面, 同理可得绕 X 轴的转动误差 $\epsilon_x(\theta)$; 3) 使双光束沿着 X 轴入射到双角锥棱镜上, 根据两个激光干涉仪与对应反射镜之间的距离以及两光束的间距可以得到转角定位误差 $\epsilon_z(\theta)$, 如图 10(b) 所示; 4) 当入射光平行于 X 轴且刚好入射到旋转中心轴时, 激光干涉仪与角锥棱镜之间的距离即为沿 X 轴的平动误差 $\delta_x(\theta)$, 如图 10(c) 所示; 5) 同理可得沿 Y 轴的平动误差 $\delta_y(\theta)$ 。该方法的直线度误差 $\delta_x(\theta)$, $\delta_y(\theta)$, $\delta_z(\theta)$ 测量范围可达 200 mm, 精度在微米量级, 角度误差 $\epsilon_x(\theta)$, $\epsilon_y(\theta)$, $\epsilon_z(\theta)$ 可实现 $0^\circ \sim 360^\circ$ 范围内的连续测量, 精度在角秒量级。通过该方法对五轴数控机床进行误差补偿后, 加工工件的各个维度几何误差减小 55% 以上。可以看出, 这种方法测量 6D 误差仅需要安装 4 次、测量 5 次, 一定程度上提高了测量效率, 但总的测量效率依然不高, 比较适用于单台数控机床和加工中心、XRD 等的出厂验收和一/两年一次的误差校正。

3.3 衍射法

进行基于准直与自准直的测量时, 利用平面镜作为敏感元件, 一束入射光只能产生一束反射光, 且该反射光仅携带二维角度信息。2000 年 Kim 等^[32] 提出利用光栅作为敏感器件, 一束入射光可以产生有特定角度关系的多束衍射光, 通过二维探测器接收 0 级衍射与 ± 1 级衍射光, 经误差分离即可获得多个自由度的误差。基于该原理, 2007 年 Jywe 等^[34] 提出一种基于衍射光栅的转轴转角定位误差 $\epsilon_z(\theta)$, 直线度误差 $\delta_x(\theta)$, 角度误差 $\epsilon_x(\theta)$ 和 $\epsilon_y(\theta)$ 四自由度误差同时测量方法, 其测量原理如图 11 所示。系统对 $\epsilon_z(\theta)$, $\epsilon_x(\theta)$, $\epsilon_y(\theta)$, $\delta_x(\theta)$ 的测量精度分别为 $1.5''$, $2''$, $2''$, $1.2 \mu\text{m}$ 。该方法所用元器件少, 成本较低, 但对安装精度要求较高, 因为光栅与两个二维 PSD 沿 Y 轴的距离精度直接影响每一项误差的计算结果, 比较适用于中等精度微小转轴的测量。

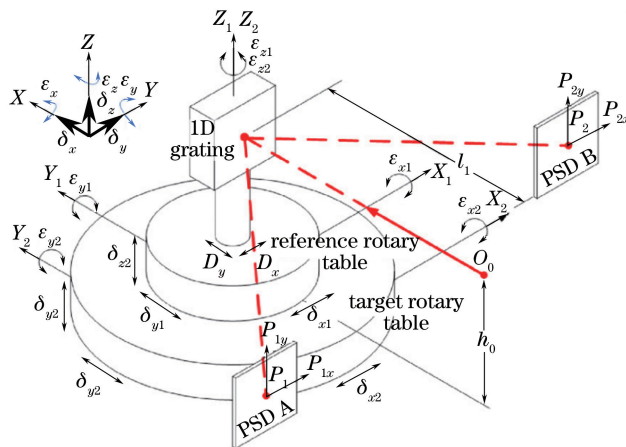


图 11 基于反射光栅的四自由度误差同时测量方法

Fig. 11 4-DOF error measurement method based on reflective diffraction grating

3.4 激光跟踪法

激光跟踪技术可以对空间运动目标进行跟踪并实时测量目标的空间三维坐标, 具有实时跟踪测量、安装快捷、操作简便等特点, 近年来广泛应用于坐标测量机和数控机床的空间几何误差测量^[35-43]。将激光跟踪技术用于转轴多自由度误差测量时, 可以进行直接测量, 也可以通过测量不同路径的空间几何误差进行计算。由于单台激光跟踪仪测量精度有限, 为提高测量精度, 出现了多台激光跟踪仪跟踪单个或多个目标^[39-40]与单台激光跟踪仪跟踪多个目标^[41-42]的测量方法, 如图 12 所示。前者需要多台激光跟踪仪, 增加了成本, 后者为目前主流的激光跟踪测量方法, 虽然相对于单目标跟踪减小了误差, 但对于高精测量仍然存在测量精度较低、测量时间较长等不足。用激光跟踪仪测量转轴多自由度误差时, 对于空间坐标 XYZ 的测量精度可控制在 $3 \mu\text{m}$ 以内, 由此计算得到的直线度误差 $\delta_x(\theta)$, $\delta_y(\theta)$, $\delta_z(\theta)$ 精度为微米量级, 角度误差 $\epsilon_x(\theta)$, $\epsilon_y(\theta)$, $\epsilon_z(\theta)$ 精度为角秒量级。该方法比较适用于大型转轴的测量。

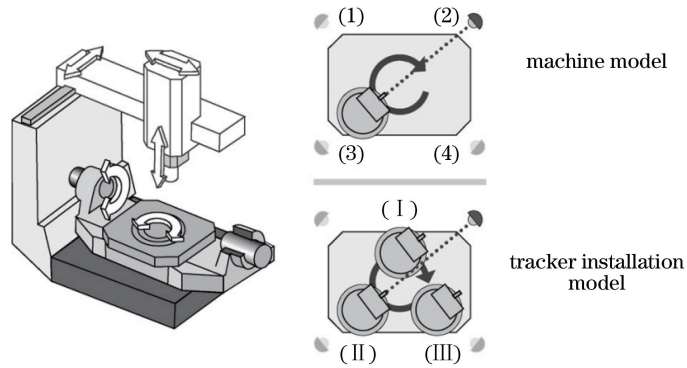


图 12 基于激光跟踪的多自由度误差同时测量方法

Fig. 12 Multi-DOF error measurement method based on laser tracker

4 结束语

通过以上分析可知,基于激光的转轴多自由度误差测量结合了干涉、衍射、准直以及几何光学等方法,各种方法各有优点,但不足之处也较为突出。激光准直法结构复杂,安装调试困难,且难以实现 $0^{\circ}\sim 360^{\circ}$ 范围内的连续测量,各个误差耦合在一起,误差串扰现象较为严重,需要通过误差分离计算各个误差;激光干涉法为单参数测量,要实现多参数测量必须增加干涉仪数目,增加了成本和安装难度,且该方法测量效率较低,测量 6D 误差所需时间较长,干涉测量受环境影响较大,在整个测量过程中的环境变化会引入一定的误差,导致综合测量精度降低;衍射法存在安装精度要求较高、需要进行误差分离计算等问题;激光跟踪法通过空间 XYZ 坐标解耦计算 6D 误差,精度相对较低。

除了以上几种方法外,近年来还有通过球杆仪^[45-53]、R-test^[54-56]、加工工件法^[57-58]等进行转轴误差测量的方法,这些方法具有测量设备简单、使用方便等优点,但是基本都为间接测量,需要通过复杂的解耦计算分离各个自由度的误差,不利于误差补偿。

目前,转轴多自由度误差测量还处于发展阶段,无法满足如今高端加工与制造领域实时、在线、多参数同时测量的需求。基于激光准直技术与激光干涉技术的两种测量方法原理简单,一个探测器可以直接测量一至两个误差项,误差串扰较小,可以将光路集成实现多自由度误差同时测量,再配合参考转台进行伺服跟踪,扩大测量范围,从而实现 $0^{\circ}\sim 360^{\circ}$ 范围内的连续测量。因此该方法是转轴多自由度误差测量的一个发展方向。

参 考 文 献

- Hong C, Ibaraki S, Matsubara A. Influence of position-dependent geometric errors of rotary axes on a machining test of cone frustum by five-axis machine tools[J]. Precision Engineering, 2011, 35(1): 1-11.
- Melichar M, Kutlwašer J. The issue of contactless setup before measuring process[J]. Procedia Engineering, 2014, 69: 1088-1093.
- Yang Z H, Hong J, Zhang J H, *et al.* Research on the rotational accuracy measurement of an aerostatic spindle in a rolling bearing performance analysis instrument[J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2014, 15(7): 1293-1302.
- Lawson N A. Control system for an articulated manipulator arm: US910205211[P]. 2015-08-11.
- Ohnishi Y, Ekuni S, Kondo M. Radar antenna device and method for controlling electric power source thereof: US14-513946[P]. 2014-10-14.
- Doleschel A, Lege M. Contactless solutions for radar rotary joint systems[C]. 16th International Radar Symposium, 2015: 451-456.
- Das J, Venkateswaran P. Design and development of multiple antenna based system for RADAR applications[C]. IEEE MTT-S International Microwave and RF Conference, 2015: 143-146.
- Li Danni, Hu Dan, Wang Jinsong, *et al.* Application of three-dimensional laser radar to the measurement of deviation angle of guns[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(10): 1014004.

- 李丹妮, 呼丹, 王劲松, 等. 三维激光雷达在火炮偏离角测量中的应用[J]. 中国激光, 2014, 41(10): 1014004.
- 9 Luo Yuan, He Yan, Hu Shanjiang, *et al.* Three-dimensional video imaging lidar system based on acousto-optic laser[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(8): 0802005.
- 罗远, 贺岩, 胡善江, 等. 基于声光扫描的三维视频激光雷达技术[J]. 中国激光, 2014, 41(8): 0802005.
- 10 Holler M, Raabe J Å. Error motion compensating tracking interferometer for the position measurement of objects with rotational degree of freedom[J]. Optical Engineering, 2015, 54(5): 054101.
- 11 Khan A W, Chen W Y. A methodology for systematic geometric error compensation in five-axis machine tools[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2011, 53(5-8): 615-628.
- 12 Zhu S W, Ding G F, Qin S F, *et al.* Integrated geometric error modeling, identification and compensation of CNC machine tools[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2012, 52(1): 24-29.
- 13 Nojehdeh M V, Habibi M, Arezoo B. Tool path accuracy enhancement through geometrical error compensation [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2011, 51(6): 471-482.
- 14 Test code for machine tools. Part 1: Geometric accuracy of machines operating under no-load or quasi-static conditions: ISO230-1[S]. Switzerland: Copyright International Organization, 2012.
- 15 Linares J M, Chaves-Jacob J, Schwenke H, *et al.* Impact of measurement procedure when error mapping and compensating a small CNC machine using a multilateration laser interferometer[J]. Precision Engineering, 2014, 38(3): 578-588.
- 16 Lee C B, Lee S K. Multi-degree-of-freedom motion error measurement in an ultraprecision machine using laser encoder - review[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2013, 27(1): 141-152.
- 17 Ibaraki S, Knapp W. Indirect measurement of volumetric accuracy for three-axis and five-axis machine tools [J]. International Journal of Automation Technology, 2012, 6(2): 110-124.
- 18 Suh S H, Lee E S, Jung S Y. Error modelling and measurement for the rotary table of five-axis machine tools[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 1998, 14(9): 656-663.
- 19 Chaney R J. Method and apparatus for measurement of angular displacement: US5237390[P]. 1993-08-17.
- 20 Dowdy C R, Courville C J. Apparatus and method for making rotary calibrations of a machine tool table: US5508806[P]. 1996-04-16.
- 21 Ohsawa N. Precision indexing angle measuring method and system for machine tools: US5969817[P]. 1999-10-19.
- 22 Wang S F, Chiu M H, Lai C W, *et al.* High-sensitivity small-angle sensor based on surface plasmon resonance technology and heterodyne interferometry[J]. Applied Optics, 2006, 45(26): 6702-6707.
- 23 Lin S T, Syu W J. Heterodyne angular interferometer using a square prism[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2009, 47(1): 80-83.
- 24 Hsieh H L, Lee J Y, Chen L Y, *et al.* Development of an angular displacement measurement technique through birefringence heterodyne interferometry[J]. Optics Express, 2016, 24(7): 6802-6813.
- 25 Guo Yang, Zhong Jingang. Focused laser self-mixing interference caused by rotatable reflector[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(3): 0308003.
- 郭扬, 钟金钢. 由反射体旋转引起的聚焦激光束自混合干涉现象[J]. 中国激光, 2015, 42(3): 0308003.
- 26 Liu C H, Jywe W Y, Shyu L H, *et al.* Application of a diffraction grating and position sensitive detectors to the measurement of error motion and angular indexing of an indexing table[J]. Precision Engineering, 2005, 29(4): 440-448.
- 27 Chen C J, Lin P D, Jywe W Y. An optoelectronic measurement system for measuring 6-degree-of-freedom motion error of rotary parts[J]. Optics Express, 2007, 15(22): 14601-14617.
- 28 Park S R, Hoang T K, Yang S H. A new optical measurement system for determining the geometrical errors of rotary axis of a 5-axis miniaturized machine tool[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2010, 24(1): 175-179.
- 29 JENAer Meßtechnik Company. Dual-frequency laser interferometer: ZLM 700 & ZLM 800-manual on the basic equipment for the measurement of translatory and rotatory quantities[Z]. 2003.
- 30 Yang Tao. Design and implementation of simultaneous measurement system of large range displacement and angle based on laser[D]. Hangzhou: Zhejiang Sci-Tech University, 2015: 14-21.
- 杨涛. 激光外差干涉大范围位移和角度同时测量系统的设计与实现[D]. 杭州: 浙江理工大学, 2015: 14-21.
- 31 He Z Y, Fu J Z, Zhang L C, *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 and Manufacture*, 2015, 88: 1-8.
- 32 Kim J A, Kim K C, Bae E W, *et al.* Six-degree-of-freedom displacement measurement system using a diffraction grating [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2000, 71(8): 3214-3219.
- 33 Liu C H, Jywe W Y, Tzeng S C. Simple three-dimensional laser angle sensor for three-dimensional small-angle measurement[J]. *Applied Optics*, 2004, 43(14): 2840-2845.
- 34 Jywe W, Chen C J, Hsieh W H, *et al.* A novel simple and low cost 4 degree of freedom angular indexing calibrating technique for a precision rotary table[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2007, 47(12): 1978-1987.
- 35 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.
- 36 Aguado S, Samper D, Santolaria J, *et al.* Identification strategy of error parameter in volumetric error compensation of machine tool based on laser tracker measurements[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2012, 53(1): 160-169.
- 37 Pan F Y, Li M, Yin J. Error model and accuracy calibration of 5-axis machine tool[J]. *Telkomnika Indonesian Journal of Electrical Engineering*, 2013, 11(8): 4251-4259.
- 38 Zhong G Y, Wang C Q, Yang S F, *et al.* Position geometric error modeling, identification and compensation for large 5-axis machining center prototype[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2015, 89: 142-150.
- 39 Aguado S, Santolaria J, Samper D, *et al.* Influence of measurement noise and laser arrangement on measurement uncertainty of laser tracker multilateration in machine tool volumetric verification[J]. *Precision Engineering*, 2013, 37(4): 929-943.
- 40 Aguado S, Santolaria J, Samper D, *et al.* Study of self-calibration and multilateration in machine tool volumetric verification for laser tracker error reduction[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, 2014, 228(7): 659-672.
- 41 Zhang Z J, Ren M J, Liu M J. A modified sequential multilateration scheme and its application in geometric error measurement of rotary axis[J]. *Procedia CIRP*, 2015, 27: 313-317.
- 42 Zhang Z J, Hu H. Three-point method for measuring the geometric error components of linear and rotary axes based on sequential multilateration[J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2013, 27(9): 2801-2811.
- 43 Wang Jindong, Guo Junjie, Fei Zhigen, *et al.* Method of geometric error identification for numerical control machine tool based on laser tracker[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2011, 47(14): 13-19.
王金栋, 郭俊杰, 费致根, 等. 基于激光跟踪仪的数控机床几何误差辨识方法[J]. *机械工程学报*, 2011, 47(14): 13-19.
- 44 Santolaria J, Majarena A C, Samper D, *et al.* Articulated arm coordinate measuring machine calibration by laser tracker multilateration[J]. *The Scientific World Journal*, 2014, 2014: 681853.
- 45 Bryan J B. A simple method for testing measuring machines and machine tools. Part 1: Principles and applications[J]. *Precision Engineering*, 1982, 4(2): 61-69.
- 46 Zargarbashi S H H, Mayer J R R. Assessment of machine tool trunnion axis motion error, using magnetic double ball bar [J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2006, 46(14): 1823-1834.
- 47 Khan A W, Chen W. A methodology for error characterization and quantification in rotary joints of multi-axis machine tools[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2010, 51(9-12): 1009-1022.
- 48 Lee D M, Zhu Z K, Lee K I, *et al.* Identification and measurement of geometric errors for a five-axis machine tool with a tilting head using a double ball-bar[J]. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2011, 12(2): 337-343.
- 49 Chen J X, Lin S W, He B W. Geometric error measurement and identification for rotary table of multi-axis machine tool using double ballbar[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2014, 77: 47-55.
- 50 Xiang S, Yang J, Zhang Y. Using a double ball bar to identify position-independent geometric errors on the rotary axes of five-axis machine tools[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2014, 70(9): 2071-2082.
- 51 Chen D J, Dong L H, Bian Y H, *et al.* Prediction and identification of rotary axes error of non-orthogonal five-axis machine tool[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2015, 94: 74-87.
- 52 Fu G Q, Fu J Z, Xu Y T, *et al.* Accuracy enhancement of five-axis machine tool based on differential motion matrix:

- Geometric error modeling, identification and compensation[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2015, 89: 170-181.
- 53 Bi Q Z, Huang N D, Sun C, *et al.* Identification and compensation of geometric errors of rotary axes on five-axis machine by on-machine measurement[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2015, 89: 182-191.
- 54 Weikert S. R-test, a new device for accuracy measurements on five axis machine tools[J]. CIRP Annals - Manufacturing Technology, 2004, 53(1): 429-432.
- 55 Ibaraki S, Oyama C, Otsubo H. Construction of an error map of rotary axes on a five-axis machining center by static R-test[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2011, 51(3): 190-200.
- 56 Florussen G H J, Spaan H A M. Dynamic R-test for rotary tables on 5-axes machine tools[J]. Procedia CIRP, 2012, 1: 536-539.
- 57 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.
- 58 Ibaraki S, Sawada M, Matsubara A, *et al.* Machining tests to identify kinematic errors on five-axis machine tools[J]. Precision Engineering, 2010, 34(3): 387-398.