

激光与光电子学进展

激光多自由度同时测量研究现状与发展趋势

龙飞, 郑发家, 贾培智, 张斌, 李家琨, 冯其波*

北京交通大学发光与光信息技术教育部重点实验室, 北京 100044

摘要 仪器是获取信息的主要手段,是信息产业的支撑。快速准确地获得多种信息是测量仪器的一大发展趋势,也是信息时代快速发展的必然要求。激光多自由度同时测量具有测量效率高、多自由度误差参数同时测量等显著优点,克服了传统激光单参数测量获取信息有限、测量效率低下等缺点,成为数控机床误差测量等领域重要的研究方向。本文按照激光单自由度测量方法到多自由度同时测量系统集成的顺序,对目前激光多自由度同时测量方法和系统进行了较全面的介绍,分析了其优缺点,并讨论了激光多自由度未来的发展趋势。

关键词 测量; 单自由度测量; 多自由度同时测量; 数控机床误差测量; 研究现状与发展趋势

中图分类号 TN206

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP222597

Research Status and Development Trend of Laser Multi-Degree-of-Freedom Simultaneous Measurement

Long Fei, Zheng Fajia, Jia Peizhi, Zhang Bin, Li Jiakun, Feng Qibo*

Key Laboratory of Luminescence and Optical Information Technology, Ministry of Education,
Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China

Abstract Instruments are the main means of obtaining information and the support of the information industry. Obtaining various information quickly and accurately is a major development trend of measuring instruments, and it is also an inevitable requirement of the rapid development of the information age. Laser multi-degree-of-freedom simultaneous measurement has significant advantages such as high measurement efficiency and simultaneous measurement of multi-degree-of-freedom error parameters. It overcomes the shortcomings of traditional laser single-parameter measurement, such as limited information acquisition and low measurement efficiency, and has become an important research direction in the field of CNC machine tool error measurements. In this paper, according to the order of the integration of the laser single degree of freedom measurement method to the multi-degree-of-freedom simultaneous measurement system, the current laser multi-degree-of-freedom simultaneous measurement method and system are comprehensively introduced, the advantages and disadvantages are analyzed, and the future development trend of the laser multi-degree-of-freedom is discussed.

Key words measurements; single degree of freedom measurement; multi-degree-of-freedom simultaneous measurement; numerical control machine tool error measurement; research status and development trend

1 引言

一个物体的空间位姿由 6 个自由度(DOF)确定,其中位置状态由 3 个线性量确定,姿态由 3 个角度量确定。随着现代科学技术的不断发展,航空航天、机械加工与装配等诸多领域对同时获取全部 6DOF 空间位姿参数提出了迫切的要求。五轴数控机床有 42 项几

何误差,三轴数控机床和三坐标测量机各有 21 项几何误差需要快速准确测量^[1],光刻机套刻、大型飞行器型架、机器人手臂姿态、风洞应变天平校测等均需要对多自由误差进行高精度同时测量与控制。在当今信息如此密集的时代,发展高精度、高效率的激光多参数同时测量方法、技术与仪器是时代发展的必然要求,也是未来激光测量仪器发展的必然趋势。

收稿日期: 2022-09-22; 修回日期: 2022-10-24; 录用日期: 2022-10-27; 网络首发日期: 2022-11-07

基金项目: 科技部雄安新区科技创新专项任务(2022XAGG0200)、国家自然科学基金重大科研仪器研制项目(51527806)

通信作者: *qbfeng@bjtu.edu.cn

激光干涉测量是实现大范围高精度长度测量的最有效方法之一,激光准直与自准直测量是实现微小线性量与角度量变化的最佳选择方案。但二者均存在测量参数不全、测量效率低等缺点。为满足现代社会追求高效率获取大容量信息的发展趋势,集成多种激光测量原理实现多自由度误差同时测量成为激光测量领域的一个主要发展方向。激光多自由度同时测量可以满足对物体全部 6DOF 空间位姿的快速测量,改善传统激光测量获得信息量有限、测量效率低的局面,为激光测量仪器的发展提供新途径。

数控机床是衡量国家制造业的重要标志^[2],五轴数控机床是高端装备的代表,是加工航空发动机叶片等复杂空间曲面的唯一手段。五轴数控机床包含 3 个直线轴、2 个转轴以及 1 个主轴,各种待测几何误差多达 42 项。如何快速准确测量得到五轴数控机床全场范围 42 项误差并建立误差补偿模型来提高其制造与加工精度,是机械与测量等领域共同提出的一个关键问题,激光同时测量数控机床直线导轨、转轴多自由误差是解决这一问题的关键和前提。此外,激光多自由度同时测量在大型构件装配、机器人手臂姿态测量与控制、风洞应变天平校测等领域有着广泛的应用前景,因此激光多自由同时测量成为激光测量的一种重要研究方向^[3]。本文按照激光单自由度测量方法到多自由度同

时测量系统集成的顺序,对近年来出现的激光多自由度同时测量方法和系统进行了较全面的介绍,分析了其优缺点,并讨论了激光多自由度未来的发展趋势。

2 1-DOF 和 2-DOF 误差测量现状

2.1 定位误差测量

定位误差是指直线导轨控制系统的读数和测量仪器测量值之间的差值。定位误差最常用的光学测量仪器是激光干涉仪^[4-5],商用激光干涉仪主要出自 Renishaw、API、ZYGO、Keysight、SIOD 等公司。

随着高精度衍射元件(DOE)的发展,以 DOE 作为分束器,利用衍射光束构成等光程干涉仪,为干涉测量提供了新的视角,其测量精度已达到亚纳米或皮米^[6]。如图 1(a)^[7]所示,Fan 等^[7]利用线性光栅的 ± 1 级衍射光构建零差光栅干涉仪,与双频干涉仪 HP5529A 对比最大偏差 18 nm。相比于传统干涉仪,零差光栅干涉仪以光栅栅格常数作为基准,对大气压和湿度不敏感,但容易受到杂散光影响,测量范围受光栅长度限制。如图 1(b)^[8]所示,Lin 等^[8]搭建了外差光栅干涉仪,使用单个光电探测器(PD)识别运动方向,可实现优于 2 nm 的测量分辨率。为减小外差光栅干涉仪的周期非线性误差,Tan 等^[9]提出了空间分离的外差光栅干涉仪,但光学结构变得复杂。

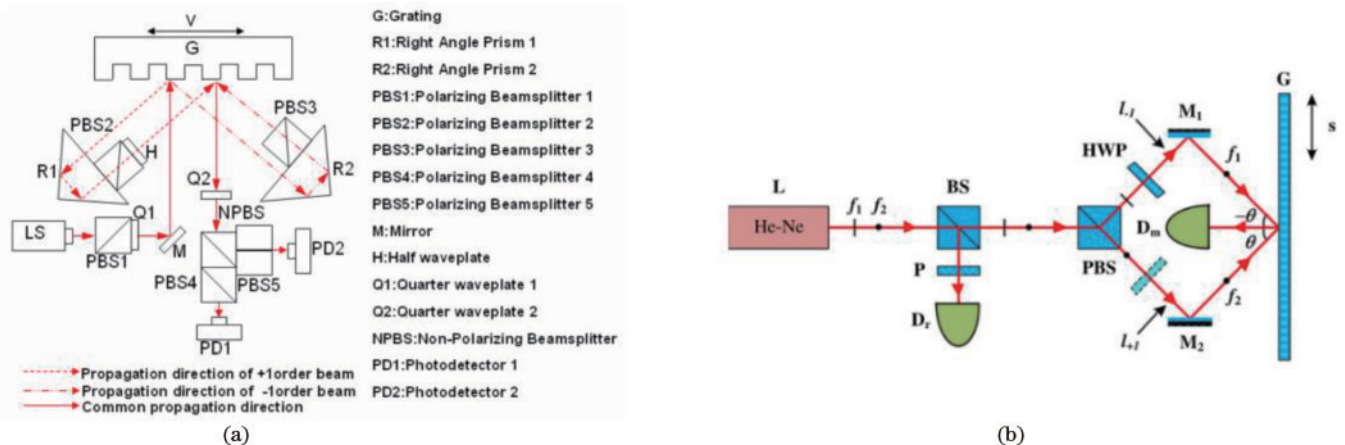


图 1 光栅干涉仪。(a)零差光栅干涉仪^[7];(b)外差光栅干涉仪^[8]

Fig. 1 Grating interferometer. (a) Homodyne grating interferometer^[7]; (b) heterodyne grating interferometer^[8]

零差和外差干涉仪均为相对位置测量,为增量干涉仪。绝对距离的测量可以通过两个或多个波长^[10-11]干涉测量,或者通过连续改变波长进行波长扫描干涉测量^[12]。多波长干涉测量易受波长精度影响^[13],扫描干涉测量的测量速度受波长扫描时间限制^[14]。光频梳(OFC)的出现克服了这些缺点,其在宽光谱上提供了离散且均匀的模式间距窄线,在频域中构建了一系列稳定的连续波^[15-17]。目前已经开发了多种基于 OFC 的测距方法^[18],如:Joó 等^[19]利用干涉相位相对于光学频率的斜率进行距离测量,分辨率可达 7 nm;Minoshima 等^[20]利用 OFC 多纵模之间的拍频相位信息进行测量,

在 240 m 的距离处精度达 8×10^{-6} 以内;Trocha 等^[21]和 Minamikawa 等^[22]利用多纵模外差干涉相位信息进行测量,该方法充分发挥了光频梳脉冲速率快和光谱分辨率高的优势,测量动态性强、范围大、精度高,是近年研究的热点^[23],也是未来的一个发展趋势。

2.2 直线度误差测量

导轨直线度误差即导轨运动的实际轴线偏离理想轴线的程度,包括水平直线度误差和竖直直线度误差^[24]。直线度误差测量方法有准直法和干涉法。

1) 准直法

准直法利用激光的准直原理在被测对象的轴向上

安装探测器,或者安装直线度敏感元件,根据探测器上的光斑位置与直线度的对应关系得到被测导轨的直线度误差。该方法易受激光光束漂移、机械漂移、空气扰动等影响,为此本课题组采用单模光纤传输法^[25-26]和共路补偿法^[27],将激光耦合至光纤出射,可基本消除激光器自身的漂移影响,再利用共路补偿的方式降低机械漂移和空气扰动的影响。

2) 干涉法

部分直线度干涉测量基于分光元件和反射器相结

合,分光元件产生两个具有一定角度的光束,反射器作为直线度敏感元件产生干涉条件^[28]。如图 2(a)^[29]所示, Kimura 等^[29]以衍射光栅作为分光元件和反射器,利用刻度光栅和参考光栅的±1级光束形成干涉,其水平直线度和垂直直线度的最大对比偏差分别为 78 nm 和 82 nm。如图 2(b)^[30-31]所示, Chen 等^[30-31]以沃拉斯顿棱镜作为分光元件,直角棱镜作为反射器,其分辨率为 10 nm。 Shi 等^[32]以 Koster 棱镜作为分束器和组合器,楔形棱镜为反射器,其分辨率为 17.7 nm。

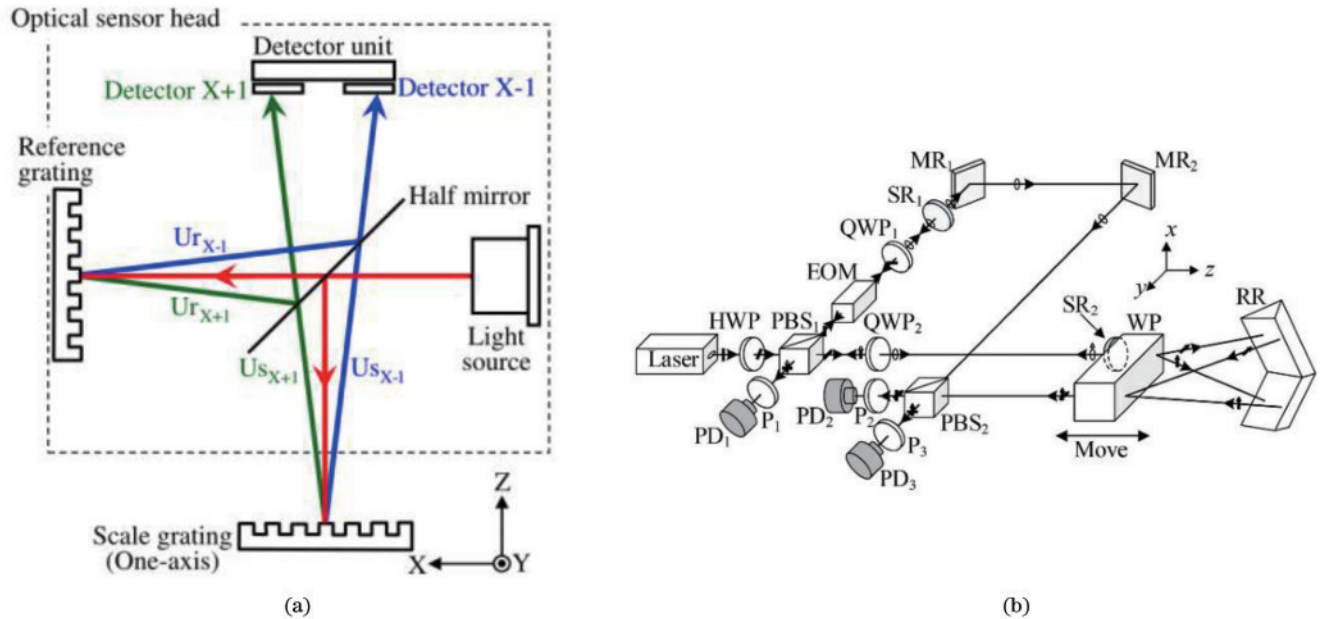


图 2 直线度干涉测量原理。(a)二维光栅干涉法^[29]; (b)沃拉斯顿棱镜干涉法^[30-31]

Fig. 2 Principle of straightness interferometry. (a) Two-dimensional grating interferometry^[29]; (b) Wollaston prism interferometry^[30-31]

2.3 偏摆角和俯仰角误差测量

角偏误差是直线导轨绕某一坐标轴旋转的误差。俯仰角和偏摆角的测量方法有:自准直法和干涉法。

1) 自准直法

小角度测量最常用、最成熟的方法为自准直法。基于自准直法研制的自准直仪在精密测量领域有不可替代的作用^[33]。具有代表性的商用光电自准直仪包括英国的 Taylor/Hobson、德国的 MOLLER 和 TRIOPTICS 公司等。

分析光路中的误差源是提高自准直法测量精度的关键。Saito 等^[34]以四象限光电二极管(QD)作为传感器,研究发现 QD 象限间的间隙越大,测量灵敏度越高,但传感器信号输出的信噪比降低。其偏摆角、俯仰角测量分辨率分别为 0.006" 和 0.01"。 Shimizu 等^[35]采用单光子探测器 (SPD) 作为传感器,研究发现大光束尺寸有利于提高测量灵敏度,但由于球差的存在,大光束会增加聚焦光斑直径,干扰聚焦光斑强度分布,其角度测量分辨率优于 0.001"。 Heikkinen 等^[36]以 CCD 作为传感器,当 CCD 传感器的 X 轴和 Y 轴不正交时会

导致测量存在两个轴之间的串扰,当光源或传感器未对准或失焦、镜头倾斜或不理想时可能导致设备测量结果存在扰动。 Li 等^[37]以角锥棱镜为角度误差敏感单元实现了大角度测量,该方法在 8° 内的测量精度优于 35"。 Chen 等^[38]以光频梳作为光源,利用衍射光束与光频的唯一确定性实现了绝对角度的测量。该方法同时兼顾了大测量范围和高测量精度,在 6° 内测量分辨率为 0.03"。

2) 干涉法

典型的干涉法基于两平行光路上位移差的变化得到角度大小。 Eom 等^[39]使用两个具有一定距离的角锥,配合两个干涉仪或差分干涉仪测量角度误差,但该方法一次只能测量一个方向的角度。 Heikkinen 等^[36]基于三个外差干涉仪同时测量两个方向的角度。 Chen 等^[40-41]利用晶体双折射效应的外差干涉法同时兼顾了大测量范围和高灵敏度。

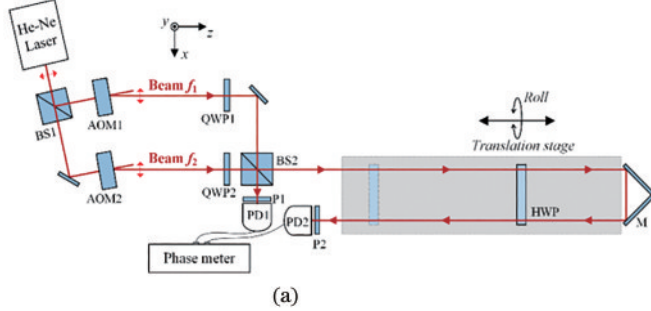
2.4 滚转角误差测量

滚转角位移垂直于纵横摆角,是六个自由度误差中最难测量的参数,测量方法有:干涉法、衍射法和准直法。

1) 干涉法

干涉法中研究最多的是基于波片和偏振器组合的

外差干涉方法^[42-49]。如图 3(a)^[49]所示,该方法以波片为敏感单元,配合高反镜构建了滚转角测量光路。其测量分辨率优于 0.1"。如图 3(b)^[50]所示,本课题组^[50]利用波片作为滚转角敏感器件,提出了一种利用光强差测量滚转角的新方法,测量分辨率优于 3.0"。Plosker 等^[51-52]和 Shi 等^[53]也在光强法方面做了研究。



Le 等^[54-57]利用双楔形棱镜和反射镜组成一套滚转角干涉系统,干涉光路采用中心对称分布的方式,避免了直线度和其他角度的串扰,其实验测量分辨率优于 0.8"。Wu 等^[58]通过分析双光束数字散斑干涉仪,建立滚转角与干涉相位分布之间的简单关系。其测量分辨率优于 0.2"。

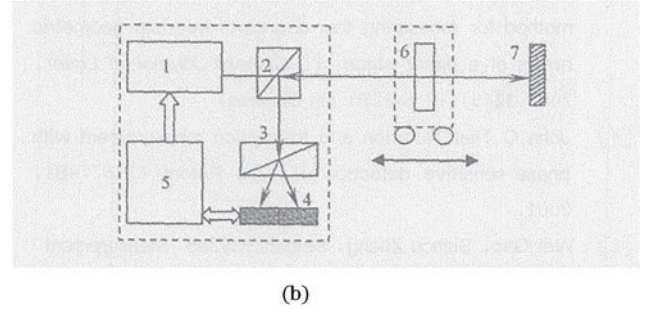


图 3 干涉法测量滚转角。(a)基于波片的外差干涉法^[49];(b)基于波片的光强法^[50]

Fig.3 Measurement of roll angle by interferometry. (a) Heterodyne interferometry based on wave plate^[49]; (b) light intensity method based on wave plate^[50]

2) 衍射法

于雪等^[59-60]利用泰伯-莫尔效应,通过测量条纹宽度和倾角的变化得到滚转角误差,其测量分辨率为 0.78"。Tang 等^[61-62]提出了一种衍射光栅与外差干涉结合的测量方法,将衍射光栅放置在滚转角位移平面,利用光栅的 1 级衍射光与偏振分光镜的反射光形成干涉,构成高分辨率的滚转角测量系统,在此基础上采用

双光栅结构,如图 4(a)^[61]所示,同时接收 ±1 级衍射光,可以提高系统分辨率,避免纵向直线运动引起的多普勒频移,还可以消除滚动半径 R 的不确定度对测量精度的影响,该实验装置可到达 0.002"的分辨率。如图 4(b)^[63]所示,Zhou 等^[63]利用角锥和光栅相结合的方法形成了两个平行光束,对两光束的位置检测可以得到滚转角误差,其测量分辨率为 0.8"。

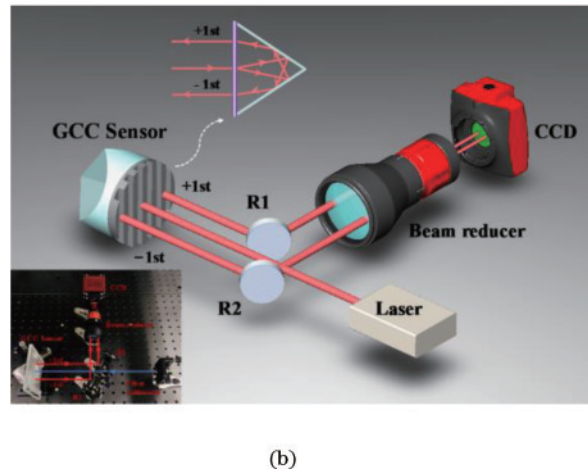
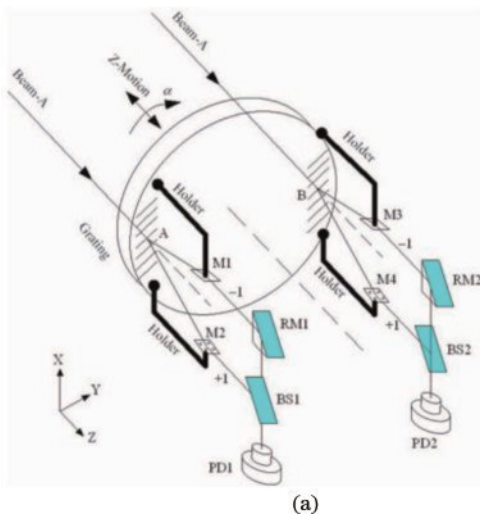


图 4 基于衍射光栅测量滚转角。(a)双光栅干涉法^[61];(b)光栅双光束法^[63]

Fig. 4 Measurement of roll angle based on diffraction grating. (a) Double grating interferometry^[61]; (b) grating double beam method^[63]

3) 准直法

准直法利用双光束光路从位置探测器反推出滚转角误差。本课题组^[64]以两个角锥棱镜作为敏感单元,实现了滚转角误差的测量,又以五角棱镜作为分光单元,结合波片和偏振分光镜实现了光学倍频,从而提高系统分辨率,测量精度约为 1"。Cai 等^[65]在靶镜端安装两个 QD 测量滚转角,测量精度在 ±1.2" 以内。

3 直线导轨多自由度测量方法现状

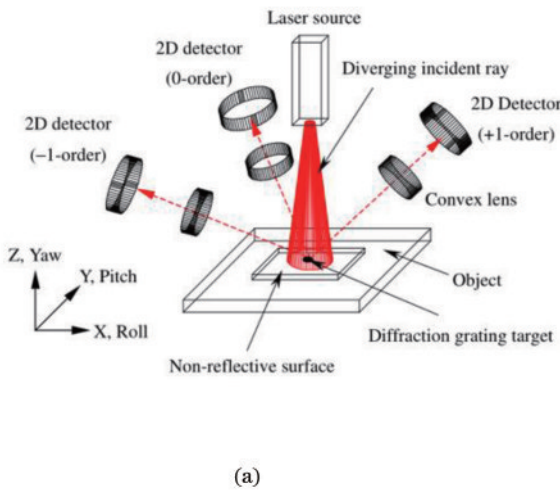
使用单参数测量仪器获得完整的 6DOF 信息,必须经过多次调整安装,操作复杂,耗时较长,无法满足现代社会追求高效率获取大容量信息的发展趋势。因此开发高效率、高精度的多自由度同时测量系统是未来激光测量仪器发展的必然趋势。下面以靶镜误差敏

感元件分类对直线导轨多自由度测量方法与系统进行介绍。

3.1 基于光栅敏感元件的多自由度测量方法

单色光入射光栅将被衍射成多级光束,衍射光束的方向由入射光束的波长、衍射光栅的栅距和入射角确定。当单色入射光束与光栅表面存在微小角度变化时,根据自准直法分析衍射光束在空间的位置变化即可解析得到三个角度误差,并且衍射光束的方向不会随光栅的平移而改变,这一特性有利于直线度测量和角度测量的分离。

如图 1 所示,光束通过光栅时,各级衍射光之间会出现相位差,当光栅存在垂直于刻线方向的位移时,各级衍射光也会产生额外的相位差^[66-67],这些性质促进了光栅干涉仪的发展。传统激光干涉仪的位移测量是通过波长函数的光程差来计算的,而光栅干涉仪使用光栅的间距,成本更低,对大气压、温度、湿度等环境影响的敏感度更低^[68],但其测量结果易受制造误差和光学元件热变形的影响^[69]。



1) 一维光栅

Kim 等^[70-71]利用发散的人射光源和小衍射光栅组合,基于几何法实现了多自由度误差同时测量,如图 5(a)^[71]所示。入射光束完全覆盖小型光栅,若光栅发生面内平移,则衍射光束的起源位置也会发生变化。该方法基于光束偏转和三角测量解耦光栅的姿态变化,误差之间相互耦合,得到 6DOF 误差需要经过非常复杂的计算。如图 5(b)^[73]所示,Liu 等^[72-73]通过干涉和准直相结合的方式提出了一种 5DOF 误差同时测量方法。根据光栅 ± 1 级衍射光束在两个 QD 上的位置变化可解析出光栅的三个角度误差和沿 Z 轴方向的定位误差,再由圆偏振干涉仪部分得到沿 X 方向的直线度误差。Lee 等^[74-75]在靶镜单元加入角锥棱镜实现了 6DOF 误差同时测量,该方法角度测量分辨率为 0.03",定位误差和 Y 方向直线度分辨率为 20 nm, X 方向直线度误差分辨率为 0.4 nm。X 方向直线度量程为 40 mm,定位误差和 Y 方向直线度量程为 $\pm 400 \mu\text{m}$,角度测量范围为 $\pm 200''$ 。

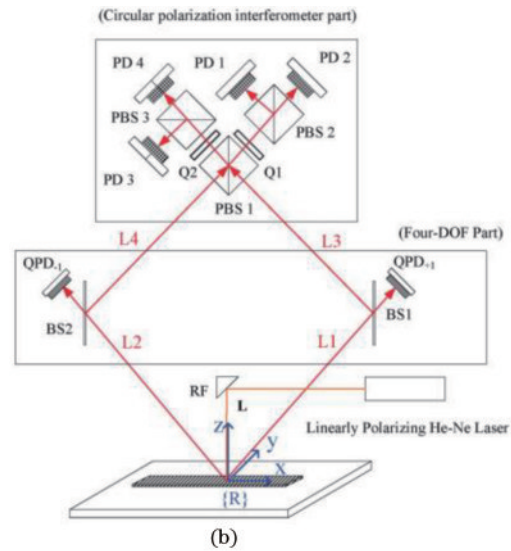


图 5 基于一维光栅的多自由度误差测量系统。(a)基于发散光源的 6DOF 误差测量系统^[71]; (b) 5DOF 误差测量系统^[73]
Fig. 5 Multi-degree-of-freedom error measurement system based on one-dimensional grating. (a) 6DOF error measurement system based on divergent light source^[71]; (b) 5DOF error measurement system^[73]

2) 二维光栅

Kimura 等^[76-81]将迈克耳孙干涉仪的结构应用到光栅,构建了 6DOF 光栅编码器,如图 6(a)^[81]所示。来自两个光栅的 ± 1 级光束相互叠加产生干涉信号^[82],利用二维光栅同时得到了两个方向的直线度误差,并且在两个光栅结构中加入了棱镜,使 ± 1 级衍射光平行,简化了测量系统的结构,缩小了体积,弥补了光栅系统短距离测量的缺陷。系统的角度组件中以自准直法测量三个角度误差,位移组件中用两个 QD 替代原来的四个 PD, QD 的象限输出使系统能够识别 x、y、z 的移动方向,使得系统结构更加紧凑。该系统位移分辨率为 2 nm,偏摆角和俯仰角分辨率为 0.1",滚转角分辨率为 0.3"。

Hsieh 等^[83]提出了一个结合多种干涉仪的 6DOF 误差同时测量方法,如图 6(b)^[83]所示。该方法包含三个相同的探测部分,每个部分均利用两个半圆形半波片分割成四个象限,利用外差光栅干涉和迈克耳孙干涉三个方向的位移^[84]。最后通过建模计算三个探测部分的测量结果获得三个角度的误差量,其位移和角度的测量分辨率为 2 nm 和 0.01"。

3.2 基于反射敏感元件的多自由度测量方法

1) 基于角锥棱镜的组合靶镜

角锥的逆向反射特性使其广泛应用于光电测量中。以角锥棱镜作为直线度敏感单元时,当导轨有 Δ 直线度位移时,经角锥棱镜的返回光线在对应方向上

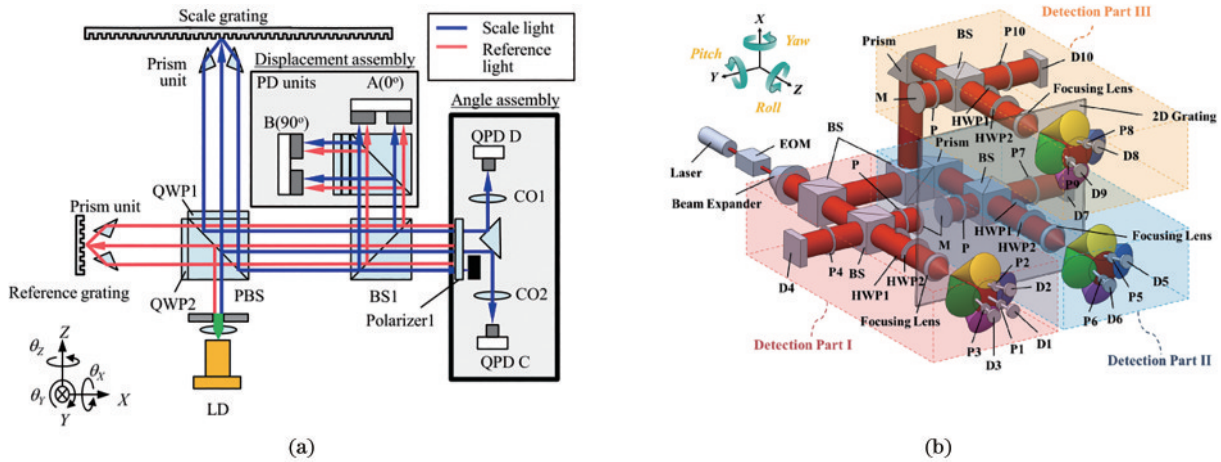


图 6 基于二维光栅的多自由度误差测量系统。(a)基于反射式光栅的 6DOF 测量系统^[81]; (b)基于透射式光栅的 6DOF 测量系统^[83]
 Fig. 6 Multi-degree-of-freedom error measurement system based on two-dimensional grating. (a) 6DOF measurement system based on reflective grating^[81]; (b) 6DOF measurement system based on transmission grating^[83]

将产生 2Δ 位移,使测量分辨率提高了一倍,并可同时进行二维直线度测量。经角锥棱镜的入射光线与出射光线始终保持平行,有利于长直线导轨的测量,并且通过调整入射光线与角锥直线的关系可以有效解决角度对直线度误差测量的串扰问题^[85]。

Fan 等^[86]利用三个角锥组合了一种 6DOF 误差测量系统。如图 7(a)^[86]所示,该系统利用多普勒效应测量靶镜端三个相对直线距离,实现定位、偏摆角和俯仰角误差的测量,再通过解析角锥返回光在 QPD 的光斑

位置,得到直线度误差和滚转角误差。英国 Renishaw 公司 XM-60 测量系统^[87]通过组合三个反射棱镜和一个滚转角测量单元实现了 6DOF 误差同时测量。如图 7(b)^[87]所示,该系统也是利用三组干涉测长值之间的相对关系得到定位、偏摆角和俯仰角误差,通过准直法测量直线度误差,滚转角根据偏振光强法测量^[88]。其定位和直线度误差测量分辨率为 1 nm 和 $0.25 \mu\text{m}$,偏摆角和俯仰角测量分辨率为 $0.006''$,滚转角测量分辨率为 $0.1''$ 。

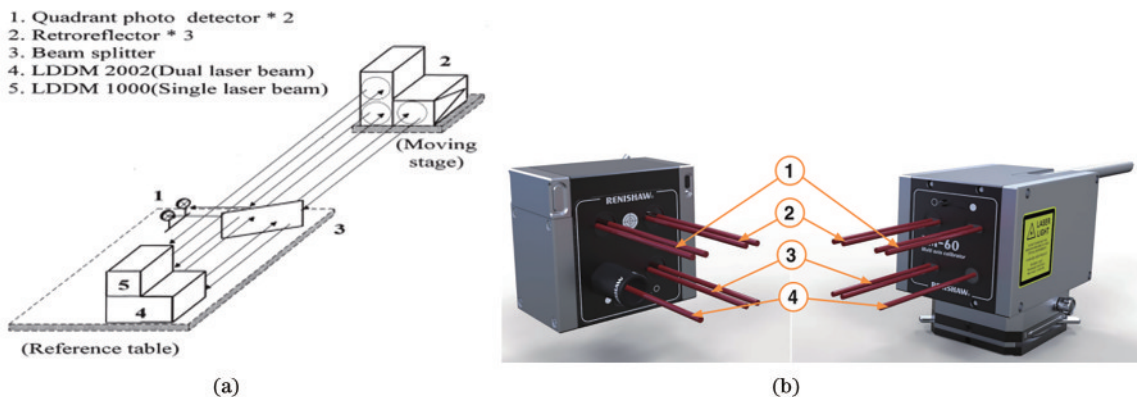


图 7 基于三个角锥棱镜的多自由度测量系统。(a)基于三个角锥棱镜的测量系统^[86]; (b)XM-60 6DOF 误差测量系统^[87]
 Fig. 7 Multi-degree-of-freedom measurement system based on three cube-corner prisms. (a) Measurement system based on three cube-corner prisms^[86]; (b) XM-60 6DOF error measurement system^[87]

Liang 等^[89-90]利用两个角锥构建了飞秒脉冲激光色散干涉仪,如图 8(a)^[90]所示,利用分光镜发射两束平行的测量光束和一束参考光束,三个光束相互干涉经单模光纤由光谱仪采样,经傅里叶变换同时解调得到绝对距离、偏摆角误差。该方法在 $\pm 5^\circ$ 的范围内一致性优于 $3''$ 。如图 8(b)^[91]所示,Liu 等^[91]在 Ni 等^[92]的基础上利用两个角锥和一个反射镜组合构建了一种 6DOF 误差测量系统。系统定位误差分辨率为 1.24 nm,直线度分辨率为 25 nm,角度分辨率为 $0.06''$ 。

Yu 等^[93]基于单个角锥棱镜配合半透半反镜与半

波片组合了一种 6DOF 测量系统。如图 9^[93]所示,该系统利用一个 QD 接收半透半反镜的返回光,通过干涉波前检测和计算每个象限相对于参考光电探测器的单独相位变化,最终以四象限的平均相位确定定位误差,通过对称相邻象限的加权相位平均值确定偏摆角和俯仰角误差^[94-95]。滚转角信息通过半波片加载至角锥返回光束中,最终通过 PD 接收的光强变化得到滚转角误差。该系统与商用干涉仪 XL-80 三次对比偏差均值:定位误差为 26.5 nm,直线度为 $0.33 \mu\text{m}$,俯仰角为 $0.028''$,偏摆角为 $0.088''$,滚转角为 $9.16''$ 。

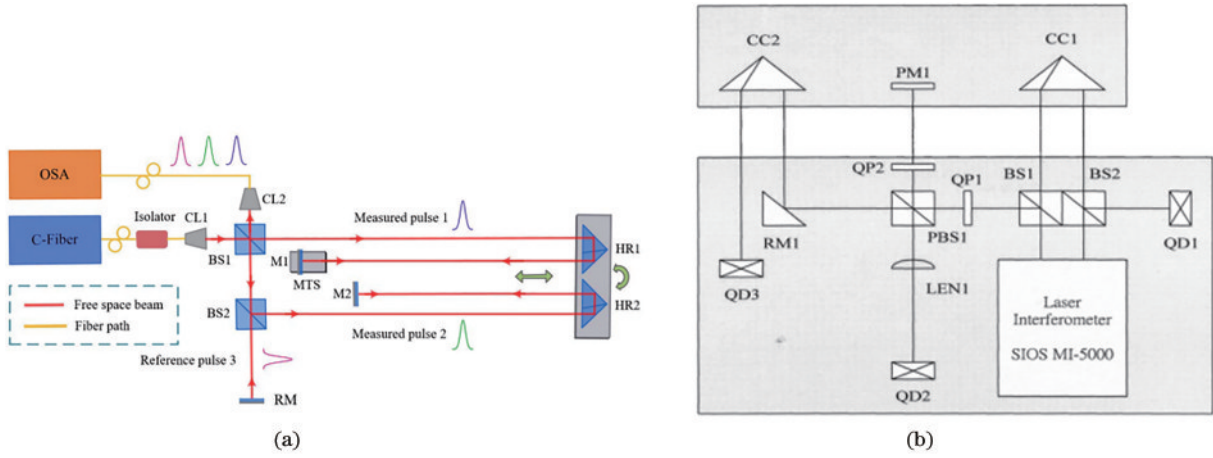


图 8 基于双角锥棱镜的多自由度测量系统。(a)飞秒激光色散干涉仪^[90];(b)基于双角锥棱镜 6DOF 测量系统^[91]

Fig. 8 Multi-degree-of-freedom measurement system based on two cube-corner prisms. (a) Femtosecond laser dispersion interferometer^[90]; (b) 6DOF measurement system based on two cube-corner prisms^[91]

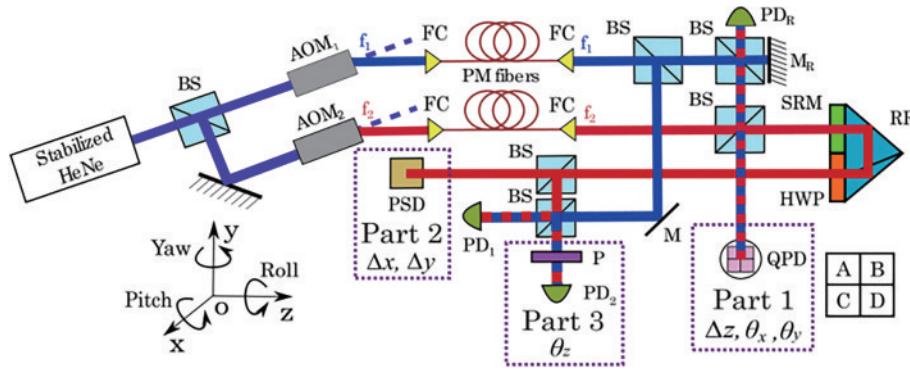


图 9 基于单角锥 6DOF 误差测量系统^[93]

Fig. 9 Error measurement system based on single cone 6DOF^[93]

如图 10(a)^[96]所示, Zhou 等^[96]基于单个角锥棱镜和二维光栅组合了一种双梳三自由度测量系统。该系统利用透射光栅的衍射特性和角锥的定向反射特性在空间展开五束平行的测量光束,在双光梳测距系统的基础上拓展了三自由度测量系统,其定位精度为 12.7 nm,角度精度为 0.088"。系统由双光梳测距法直接获得绝对距离,通过快速傅里叶变换计算 I_{Y+1} 和 I_{Y-1} 之间、 I_{X+1} 和 I_{X-1} 之间的相位差得到角度误差。该方法结合了飞行时间法和干涉法的优点^[97]。如图 10(b)^[98]所示,信号光梳 Comb1 的重复频率为 f_{r1} ,本征光梳 Comb2 重复频率 $f_{r2} = f_{r1} + \Delta f_r$,其中 Δf_r 为两台光频梳之间的重复频率差。来自信号光梳 Comb1 的信号脉冲经过由参考臂和靶镜构成的迈克耳孙干涉仪结构,产生在时域上分离的参考脉冲 (I_R) 和测量脉冲 (I_M),两者之间的时延即对应的绝对距离信息,信号光梳的两个脉冲信号经过分光器同时与本征光梳脉冲在时域上发生 $1/\Delta f_r$ 的周期性重叠,得到互相关干涉信号,如图 10(c)^[98]所示,被测距离值 D_{TOF} 可表示为

$$D_{TOF} = \frac{v_g}{2} \cdot \Delta t \cdot \frac{\Delta f_r}{f_{r1}}, \quad (1)$$

式中: v_g 为光脉冲的群速度; Δt 为参考与测量干涉信号之间的时间延迟。

飞行时间法利用了光频梳在时域上一系列飞秒级别脉宽的超短脉冲,为实现更高精度的双光梳测距,还需要进一步利用光频梳的频域特性,如图 10(d)^[98]所示。干涉法本质上是通过对多纵模外差干涉相位信息来解算被测距离,其关键在于对双光梳系统的噪声抑制,噪声抑制后可实现稳定的单纵模外差干涉相位提取,通过参考和测量干涉信号的载波相位差 $\Delta\varphi_c$,可以得到更精确的距离值 D_c , D_c 可表示为

$$D_c = (N_c + \Delta\varphi_c / 2\pi) \cdot \frac{\lambda_c}{2}, \quad (2)$$

式中: λ_c 表示空气红的载波波长; N_c 表示半载波波长 ($\lambda_c/2$) 的整数周期。

美国 API 公司 XD Laser 系统^[99]靶镜端组合了角锥棱镜、分光棱镜 (BS) 等元件,如图 11(a)、(b)所示,该系统利用角锥和 BS 组成干涉仪测量定位误差。基于准直法由 QD 和位置敏感器件 (PSD) 探测器的光斑位置变化得到两个直线度误差和两个角度误差。滚转角通过基准水平仪和测量水平仪的差值获得,由于电子水平仪的测量原理,该系统无法测量数控机床竖直轴的

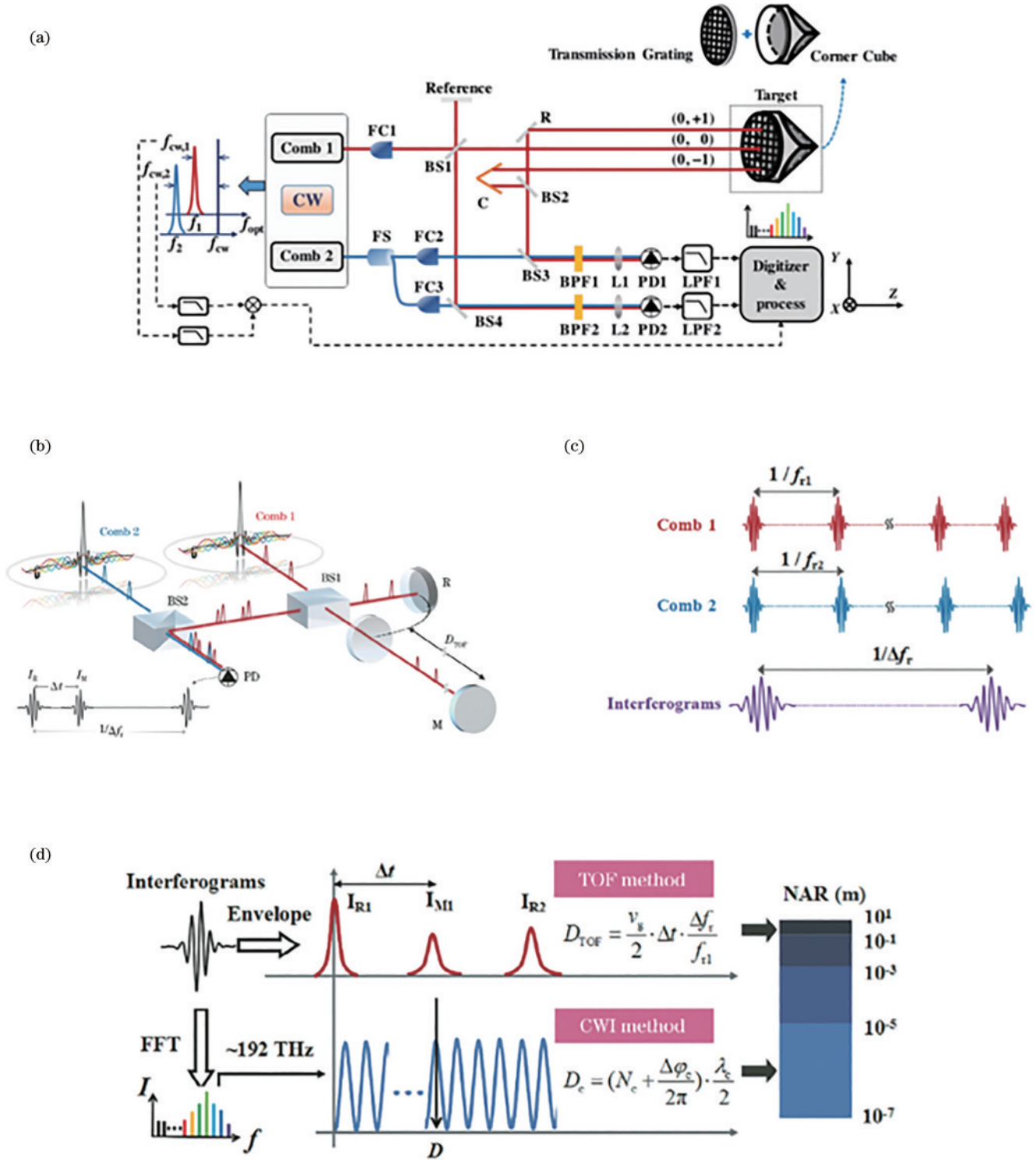


图 10 基于单角锥棱镜的多自由度测量系统。(a)基于双梳干涉3DOF测量系统^[96];(b)双光梳测距原理^[98];(c)双光梳时域特性^[98];(d)双光梳组合测距原理^[98]

Fig. 10 Multi-degree-of-freedom measurement system based on a cube-corner prism. (a) 3DOF measurement system based on dual optical comb interference^[96]; (b) schematic of dual-comb ranging system^[98]; (c) time-domain characteristic of dual-comb system^[98]; (d) principle of dual-comb combined ranging method^[98]

滚转角误差。其定位误差的测量精度为 $0.2 \mu\text{m}/\text{m}$, 直线度为 $(0.2+0.1) \mu\text{m}/\text{m}$, 偏摆角和俯仰角为 $(0.5'' + 0.05'') \text{m}^{-1}$, 滚转角为 $0.5''$ 。西安交通大学郭俊康等^[100]利用倾角传感器测量滚转角, 与角锥配合研制了

导轨 5DOF 同时测量系统。该系统包含共光路激光漂移分离检测装置, 以对激光漂移进行补偿。此外, Liu 等^[101-103]、Guo 等^[104]和 Cai 等^[105]均集成了基于角锥组合棱镜的多自由度测量系统。

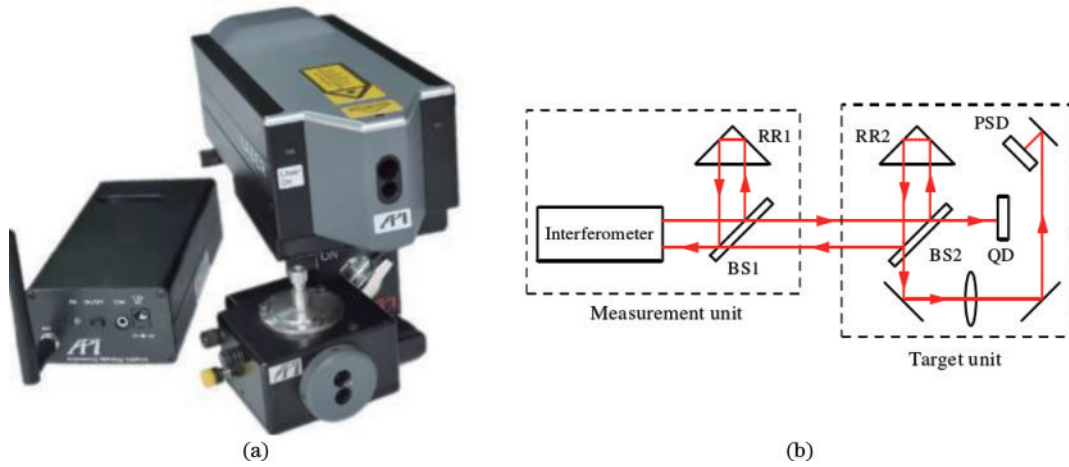


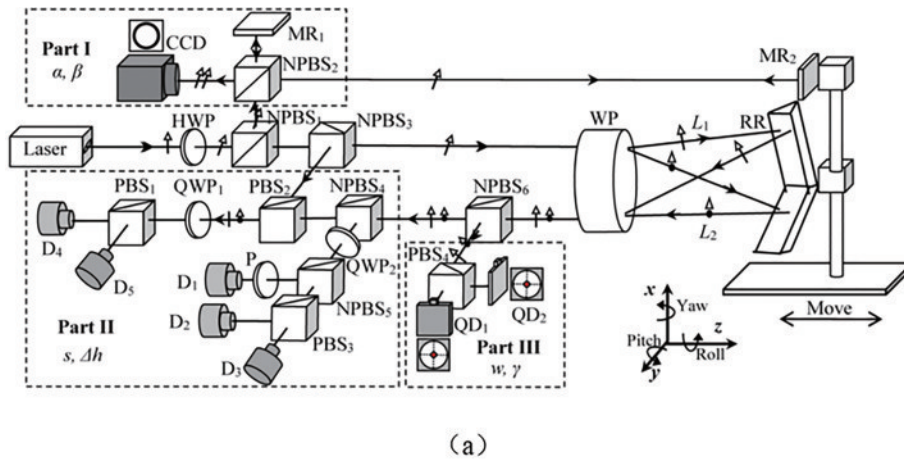
图 11 API XD Laser 6DOF 误差测量系统。(a)XD Laser 系统实物图^[99]; (b) XD Laser 系统光路图^[99]

Fig. 11 API XD Laser 6DOF error measurement system. (a) Photo of XD Laser system^[99]; (b) optical path diagram of XD Laser system^[99]

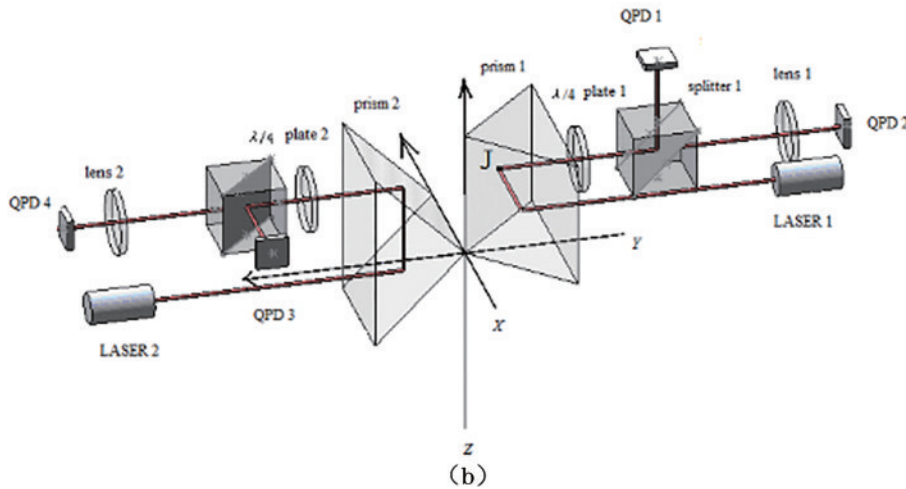
2) 基于直角棱镜的组合靶镜

Chen 等^[106-107]利用两个直角反射镜和一个平面反射镜组合了一种 6DOF 误差测量系统。如图 12(a)所示,测量系统可分为三个部分:第一部分中 MR1 反射光和靶镜端平面镜 MR2 的返回光束在 CCD 形成干涉

条纹,采用图像处理技术来检测干涉条纹的间距得出偏摆角和俯仰角误差^[108-110];第二部分通过沃拉斯顿棱镜和直角反射镜组合成了新型干涉仪,通过解析 D4、D5 两探测器的干涉条纹可以得到两个直角棱镜的在 Z 方向的相对位移,从而计算出 X 方向直线度误差和 Z



(a)



(b)

图 12 基于直角棱镜的多自由度测量系统。(a)基于直角棱镜的 6DOF 测量系统^[107]; (b)基于直角棱镜的 5DOF 测量系统^[112]

Fig. 12 Multi-degree-of-freedom measurement system based on right angle prism^[107]; (b) 5DOF measurement system based on right angle prism^[112]

方向的定位误差^[111];第三部分利用准直法可由 QD1、QD2 探测器上光斑位置的变化得到水平直线度误差和滚转角误差。该系统竖直直线度和定位误差分辨率 0.01 μm , 水平直线度分辨率 0.75 μm , 滚转角测量分辨率 2.94", 偏摆角度仰角分辨率 0.069"。Yang 等^[112]利用两个相互垂直的直角棱镜组成了一种 5DOF 误差测量系统。如图 12(b)^[112]所示, 该测量系统由两个独立的光路组成, 具有相同的光路和原理, 每条光路可测量三个自由度误差。实验结果表明, 该系统直线度误差测量精度为 1 μm , 角度误差测量精

度为 0.1"。

Fan 等^[113]利用 L 型平面镜和长直角棱镜组成了 X-Y 平台的 6DOF 误差同时测量系统。如图 13 所示, 该系统利用三台双频干涉仪和两个 QD 实现 Y 轴的定位、三个角度和竖直直线度误差的测量, 再利用干涉仪测量 X 轴的定位误差, 巧妙地互补实现了 X-Y 平台的 6DOF 误差同时测量。此外, Lee 等^[114]、Wang 等^[115]和 Chen 等^[116]通过改变测量光线传播方向, 将定位误差转变为面内位移进行测量, 基于准直法测量 6DOF 误差, 如图 14^[114-116]所示, 该方式测量范围受探测器大小限

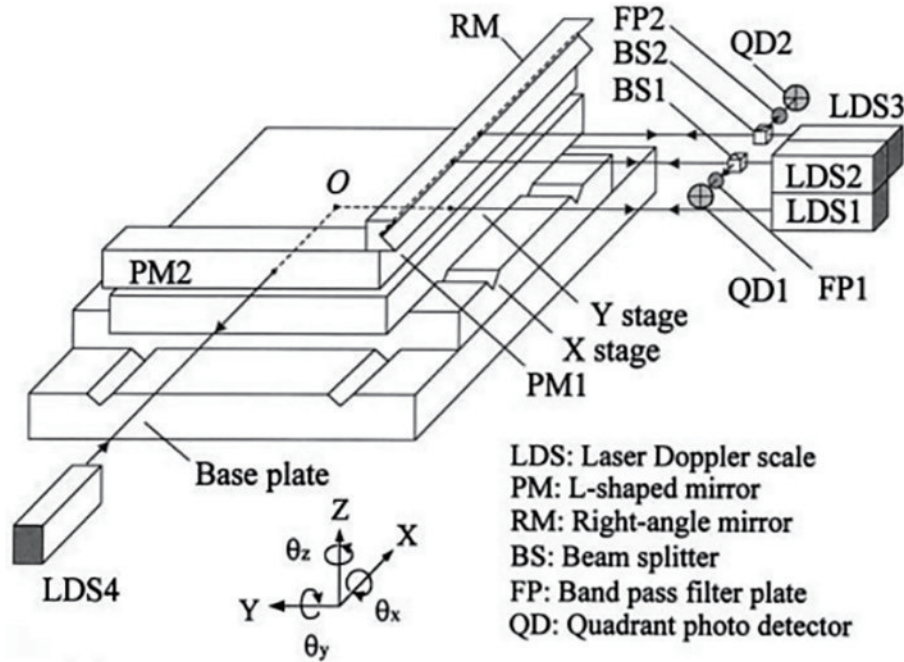


图 13 X-Y 平台 6DOF 同时测量系统^[113]

Fig. 13 X-Y platform 6DOF simultaneous measurement system^[113]

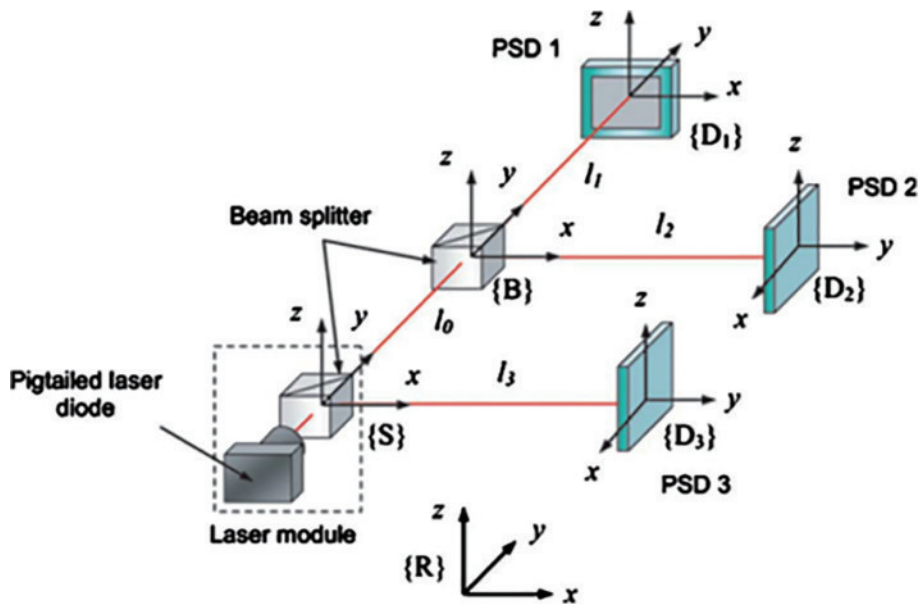


图 14 基于准直光束的多自由度测量系统^[114-116]

Fig. 14 Collimated beam based multi-degree-of-freedom measurement system^[114-116]

制,系统平动误差精度为 $\pm 0.6 \mu\text{m}$,角度误差分量精度为 $\pm 0.6''$ 。

4 转轴多自由度测量方法现状

直线轴和旋转轴的 6DOF 几何运动误差测量方法类似,主要区别在于直线轴需要大量程测量定位误差,而旋转轴需要在 360° 范围测量旋转角度。转轴的 6DOF 误差包括绕 Z 轴的转角定位误差、绕 X 和 Y 轴的两个角度误差,以及沿 X、Y、Z 三个轴的平移误差。其中转角定位误差是 6DOF 误差中最重要的一项。转轴的多自由度误差测量发展晚于直线轴,只有少数仪

器可以同时测量旋转轴的所有运动误差。

Chen 等^[117]以锥形六棱镜作为靶镜单元,结合三个半导体激光器和三个 PSD 探测器搭建了转轴 6DOF 误差同时测量系统。如图 15 所示,根据 PSD 上光斑位置的变化以及激光器、PSD 和锥形六棱镜之间的位置关系,可计算得到 6DOF 误差。以角锥棱镜进行实验得到位移误差测量精度 $0.5 \mu\text{m}$,角度测量精度 $0.4''$ 。Jywe 等^[118]利用光栅分光实现了旋转轴的三个角度误差测量和一个线性误差测量。Schwenke 等^[119]使用激光跟踪仪研究了 6DOF 误差测量。Park 等^[120]和 He 等^[121]均提出了分步多自由度测量方法。

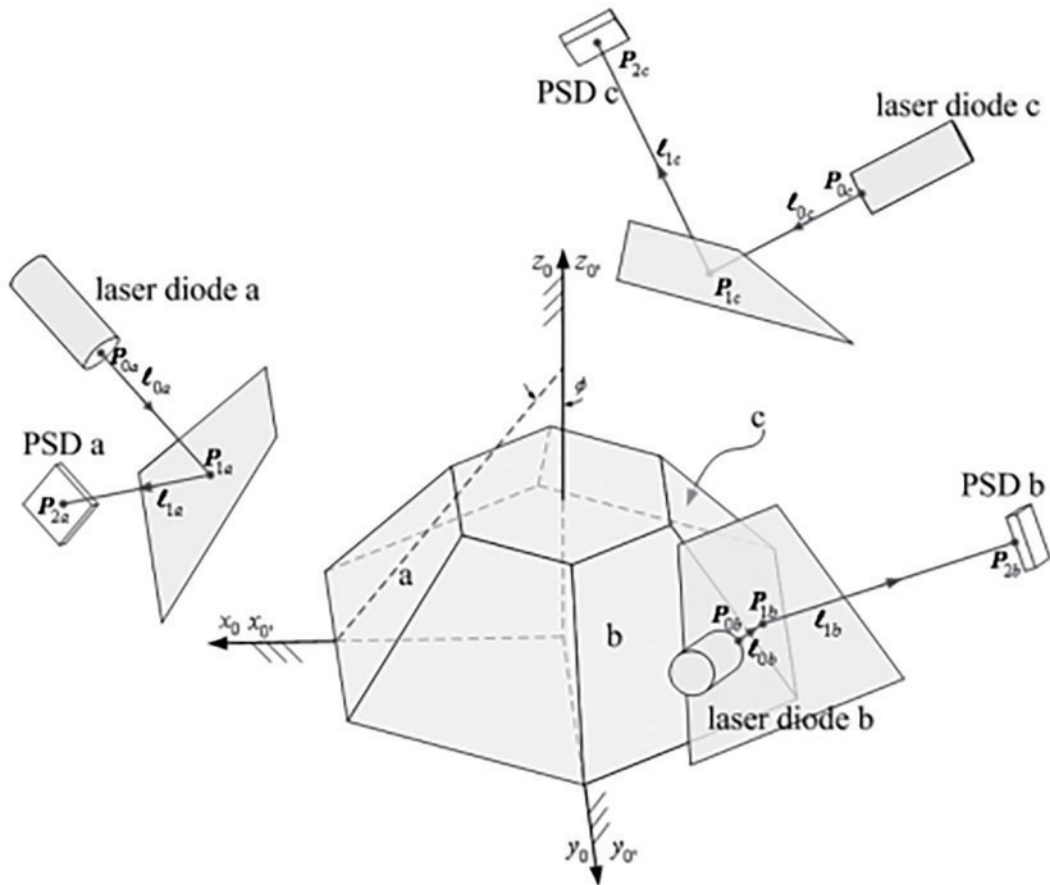


图 15 基于锥形六棱镜 6DOF 误差同时测量系统^[117]

Fig. 15 Simultaneous measurement system of 6DOF error based on conical hexaprisms^[117]

本课题组在直线轴和转轴 6DOF 同时测量系统方面做了大量研究^[122-126]。首次研制出基于单根保偏光纤耦合双频激光的 6DOF 误差同时测量系统,采用光纤连接的方式去除了激光热源对测量头单元的影响,获得高质量的高斯光斑,提升了光线基准的稳定性。如图 16(a)^[126]所示,直线轴 6DOF 测量仪器定位误差、直线度误差、偏摆角俯仰角误差和滚转角误差分辨率分别为 1 nm 、 50 nm 、 $0.05''$ 、 $0.1''$ 。在单直线轴测量的基础上,本课题组进一步集成光线转向单元和 18 项误差敏感单元,可同时数控机床三直线轴 21 项几何误差同时测量^[3, 127-128]。如图 16(b)^[129]所示,该系统以某

一直线轴 6DOF 误差为基础,通过转向单元控制光线 90° 转向,使光线能够分别平行于数控机床的 3 个直线轴进行测量得到 18 项误差,再根据 3 个直线轴的直线度测量结果和光线的转向误差计算得到 3 项垂直度误差。如图 16(c)^[130]所示,旋转轴 6DOF 误差同时测量仪器采用了伺服跟踪策略和误差模型分析的方法。为高效测量五轴数控机床的所有 42 项几何误差,本课题组又提出了一种可兼顾直线轴和旋转轴 6DOF 几何运动误差测量方案,如图 16(d)^[131]所示。该方案采用干涉法测量直线轴定位误差和回转轴径向误差,其他 5DOF 几何运动误差采用激光准直法与自准直法测量。

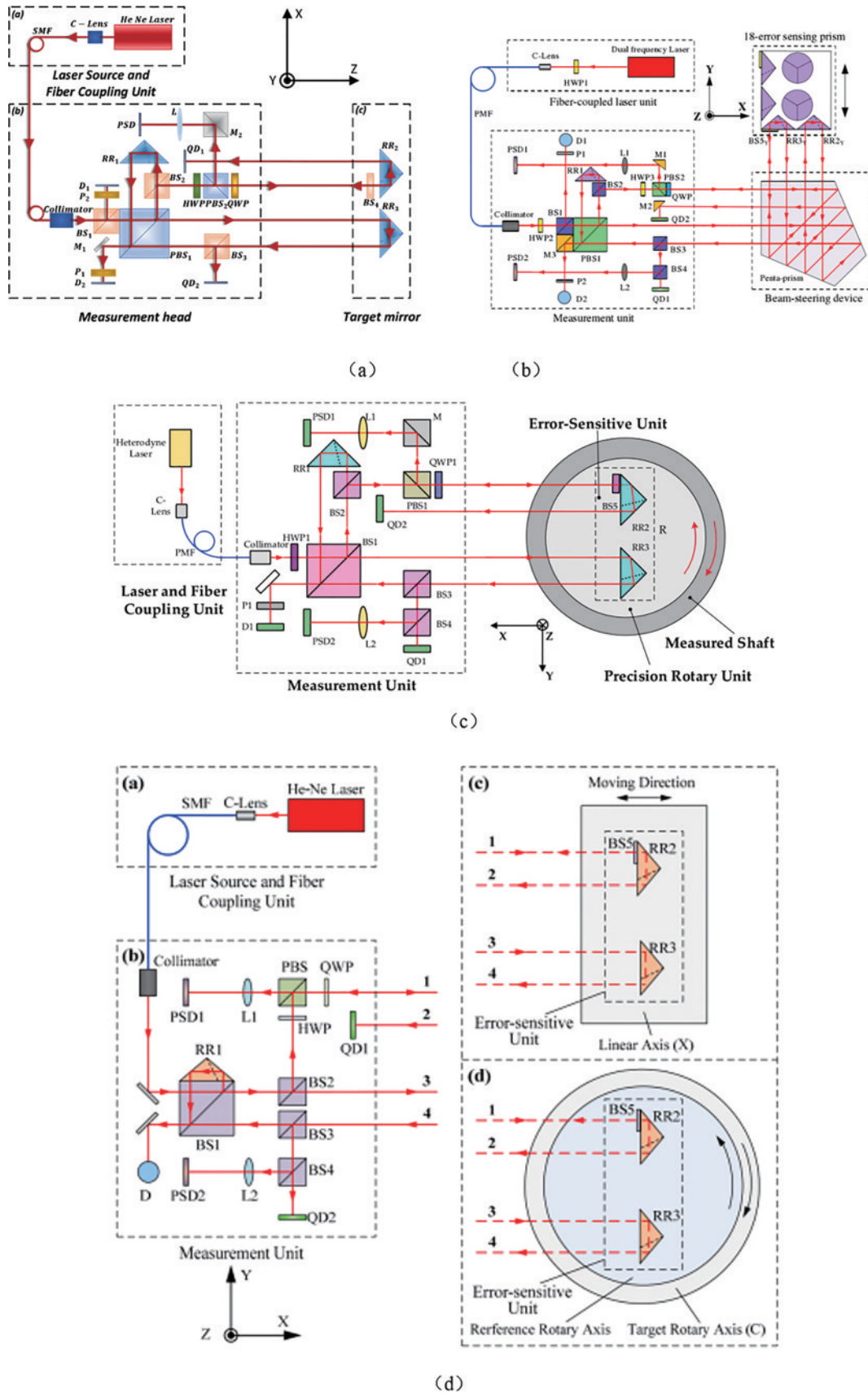


图 16 数控机床多参数同时测量系统。(a)单直线轴 6DOF 误差测量系统^[126];(b)三直线轴 21 项误差测量系统^[129];(c)旋转轴 6DOF 误差同时测量方案^[130];(d)直线轴和旋转轴 6DOF 误差同时测量方案^[131]

Fig. 16 Multi-parameter simultaneous measurement system of NC machine tool. (a) Single linear axis 6DOF error measurement system^[126]; (b) 21 errors measurement system for 3 linear^[129]; (c) simultaneous measurement of rotation axis 6DOF error^[130]; (d) linear axis and rotation axis 6DOF error measurement scheme^[131]

5 结束语

目前单参数测量中激光干涉仪和自准直仪最为成熟,均形成了商业化产品,可对定位误差、偏摆角和俯仰角误差进行快速高精度测量。直线度误差依靠角锥棱镜的优点利用准直法也可实现大范围、高精度的测量。滚转角测量方法仍需要进一步完善,基于波片产生相位差的滚转角干涉方法,需要在导轨的三个部位均安装光学元件,且不宜与其他自由度误差测量方法集成,难以在激光多自由度误差同时测量中得到应用。光强差法的测量精度仍需要提升,并需要解决杂散光和外界扰动对测量的影响。衍射干涉法的测量精度高,且依靠光栅的特性易与其他自由度误差测量集成,具有一定发展潜力。

基于单自由度测量方法集成发展起来的激光多自由度误差同时测量近年来取得了主要进展,但尚未得到广泛应用。概括起来,我们认为未来激光多自由度同时测量会呈现如下几个发展态势:

1) 随着 6DOF 测量方法与技术逐渐发展成熟,发展集成度高、靶镜体积小的嵌入式多自由度同时测量模块可为高端数控机床等高端设备提供新的测试手段。例如, Yu 等^[93]的靶镜单元由单个角锥、半波片和半透半反镜组成,尺寸仅 25 mm×25 mm×25 mm≈50 g,该测量系统的微小体积使其更具有竞争力,拓展了系统的使用范围。

2) 基于新型误差敏感光学元件形成了 6DOF 同时测量方法与系统。开发新的光学误差敏感单元以实现更简单的测量结构,更高的测量效率,更多的测量参数是未来的一个重要发展趋势,例如图 9、图 13 的一维和二维光栅,图 19 的组合 18 误差敏感光学器件等。

3) 基于单探测器获得多个自由度误差信息的测量方法与系统。目前多自由度测量系统常用 PD、QD、PSD、CCD 等作为激光探测器,一个探测器用于测量一个或两个自由度信息。Yu 等^[93]通过波前检测利用一个 QD 同时探测定位、偏摆角和俯仰角三个自由度信息,充分利用了激光中所包含的多种信息以及探测器自身特性,提高了激光信息和探测器的利用程度,有利于简化测量光路。利用单探测器同时获取多个自由度信息,提高了激光信息的获取和解析能力,是未来测量系统的发展方向之一。

4) 基于新型光源的多自由度测量方法与系统。其中典型代表就是光频梳, Zhou 等^[96]以光频梳作为新的测量光源构建多自由度同时测量系统,实现了长距离、大范围、高精度误差测量,大大地拓宽了测量系统的应用范围。

5) 同时测量不同类型对象与获得多个参数的测量方法与系统。高效率获取不同类型被测物体多种信息是未来测量仪器的一大发展趋势。本课题组^[122-131]在单轴 6DOF 测量的基础上通过转向控制实现数控机

床三直线轴 21 项误差全部测量,并提出了兼容直线轴和转轴的 6DOF 误差测量方法,可测量得到五轴数控机床 42 项误差信息,极大地提高了数控机床误差测量效率,为数控机床的误差补偿提供了一种新的发展途径。

参 考 文 献

- [1] Fan K C, Wang H Y, Yang H W, et al. Techniques of multi-degree-of-freedom measurement on the linear motion errors of precision machines[J]. *Advanced Optical Technologies*, 2014, 3(4): 375-386.
- [2] 杜正春, 杨建国, 冯其波. 数控机床几何误差测量研究现状及趋势[J]. *航空制造技术*, 2017, 60(6): 34-44.
Du Z C, Yang J G, Feng Q B. Research status and trend of geometrical error measurement of CNC machine tools [J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2017, 60(6): 34-44.
- [3] 郑发家. 数控机床三直线轴 21 项几何误差测量系统与应用研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2021.
Zheng F J. Study on system and application for measuring 21 geometric errors of three linear axes of machine tools[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2021.
- [4] 匡萃方. 激光多自由度同时测量方法的研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2006.
Kuang C F. Research on simultaneous measurement of multiple degrees of freedom by laser[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2006.
- [5] 谈宜东, 徐欣, 张书练. 激光干涉精密测量与应用[J]. *中国激光*, 2021, 48(15): 1504001.
Tan Y D, Xu X, Zhang S L. Precision measurement and applications of laser interferometry[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(15): 1504001.
- [6] Hu P C, Chang D, Tan J B, et al. Displacement measuring grating interferometer: a review[J]. *Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering*, 2019, 20(5): 631-654.
- [7] Fan K C, Liu Y S, Chen Y J, et al. A linear diffraction grating interferometer with high accuracy[J]. *Proceedings of SPIE*, 2006, 6280: 628008.
- [8] Lin C B, Yan S H, Du Z G, et al. Symmetrical short-period and high signal-to-noise ratio heterodyne grating interferometer[J]. *Chinese Optics Letters*, 2015, 13(10): 100501.
- [9] Tan J B, Hu P C, Xing X. Double frequency laser grating interference two-dimensional measurement method: CN103604375[P]. 2017-02-01.
- [10] Pollinger F, Meiners-Hagen K, Wedde M, et al. Diode-laser-based high-precision absolute distance interferometer of 20 m range[J]. *Applied Optics*, 2009, 48(32): 6188-6194.
- [11] 李桂存, 方亚秒, 张浩, 等. 飞秒激光合成波长法测距的功率-相位转换误差修正研究[J]. *中国激光*, 2021, 48(1): 0104002.
Li G C, Fang Y H, Zhang H, et al. Correction of power-to-phase conversion for distance error measurement using

- femtosecond laser synthetic wavelength method[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(1): 0104002.
- [12] Kikuta H, Iwata K, Nagata R. Distance measurement by the wavelength shift of laser diode light[J]. Applied Optics, 1986, 25(17): 2976-2980.
- [13] Gao W, Kim S W, Bosse H, et al. Measurement technologies for precision positioning[J]. CIRP Annals, 2015, 64(2): 773-796.
- [14] Dai X L, Katuo S T. High-accuracy absolute distance measurement by means of wavelength scanning heterodyne interferometry[J]. Measurement Science and Technology, 1998, 9(7): 1031-1035.
- [15] Kim S W. Combs rule[J]. Nature Photonics, 2009, 3(6): 313-314.
- [16] Udem T, Holzwarth R, Hänsch T W. Optical frequency metrology[J]. Nature, 2002, 416(6877): 233-237.
- [17] 吴腾飞, 周强, 林嘉睿, 等. 光频扫描干涉绝对距离测量[J]. 中国激光, 2021, 48(19): 1918002.
Wu T F, Zhou Q, Lin J R, et al. Frequency scanning interferometry absolute distance measurement[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(19): 1918002.
- [18] Zhou S Y, Xiong S L, Zhu Z B, et al. Simplified phase-stable dual-comb interferometer for short dynamic range distance measurement[J]. Optics Express, 2019, 27(16): 22868-22876.
- [19] Joo K N, Kim S W. Absolute distance measurement by dispersive interferometry using a femtosecond pulse laser[J]. Optics Express, 2006, 14(13): 5954-5960.
- [20] Minoshima K, Matsumoto H. High-accuracy measurement of 240-m distance in an optical tunnel by use of a compact femtosecond laser[J]. Applied Optics, 2000, 39(30): 5512-5517.
- [21] Trocha P, Karpov M, Ganin D, et al. Ultrafast optical ranging using microresonator soliton frequency combs[J]. Science, 2018, 359(6378): 887-891.
- [22] Minamikawa T, Hsieh Y D, Shibuya K, et al. Dual-comb spectroscopic ellipsometry[J]. Nature Communications, 2017, 8: 610.
- [23] 吴冠豪, 周思宇, 杨越棠, 等. 双光梳测距及其应用[J]. 中国激光, 2021, 48(15): 1504002.
Wu G H, Zhou S Y, Yang Y T, et al. Dual-comb ranging and its applications[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(15): 1504002.
- [24] 夏波. 导轨多自由度误差在线测量方法的研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2020.
Xia B. Research on the on-line measurement of multi-degree-of-freedom error of guideway[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2020.
- [25] 冯其波, 梁晋文. 单模光纤激光准直仪的研制[J]. 激光技术, 1994, 18(6): 357-360.
Feng Q B, Liang J W. Development of a single mode fiber laser collimator[J]. Laser Technology, 1994, 18(6): 357-360.
- [26] Feng Q B, Zhang B, Kuang C F. A straightness measurement system using a single-mode fiber-coupled laser module[J]. Optics & Laser Technology, 2004, 36(4): 279-283.
- [27] 由凤玲, 冯其波, 张斌. 基于共路光线漂移补偿的直线度测量[J]. 光学精密工程, 2011, 19(3): 515-519.
You F L, Feng Q B, Zhang B. Straightness error measurement based on common-path compensation for laser beam drift[J]. Optics and Precision Engineering, 2011, 19(3): 515-519.
- [28] Weichert C, Köchert P, Schötka E, et al. Investigation into the limitations of straightness interferometers using a multisensor-based error separation method[J]. Measurement Science and Technology, 2018, 29(6): 064001.
- [29] Kimura A, Wei G, Zeng L J. Position and out-of-straightness measurement of a precision linear air-bearing stage by using a two-degree-of-freedom linear encoder[J]. Measurement Science and Technology, 2010, 21(5): 054005.
- [30] Chen B Y, Mao W D, Lou Y T, et al. Simultaneous measurement of the straightness error and its position using a modified Wollaston-prism-sensing homodyne interferometer[J]. Measurement Science and Technology, 2020, 31(8): 085004.
- [31] Lou Y T, Li Z Y, Yan L P, et al. A phase differential heterodyne interferometer for simultaneous measurement of straightness error and displacement[J]. Optics Communications, 2021, 497: 127195.
- [32] Shi K, Su J H, Hou W M. Roll angle measurement system based on differential plane mirror interferometer[J]. Optics Express, 2018, 26(16): 19826-19834.
- [33] 安正杰. 高精度二维自准直仪研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2020.
An Z J. Research on high accuracy two-axis autocollimator[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2020.
- [34] Saito Y, Arai Y, Gao W. Investigation of an optical sensor for small tilt angle detection of a precision linear stage[J]. Measurement Science and Technology, 2010, 21(5): 054006.
- [35] Shimizu Y, Tan S L, Murata D, et al. Ultra-sensitive angle sensor based on laser autocollimation for measurement of stage tilt motions[J]. Optics Express, 2016, 24(3): 2788-2805.
- [36] Heikkinen V, Byman V, Palosuo I, et al. Interferometric 2D small angle generator for autocollimator calibration[J]. Metrologia, 2017, 54(3): 253-261.
- [37] Li R P, Zhou M, Konyakhin I, et al. Cube-corner autocollimator with expanded measurement range[J]. Optics Express, 2019, 27(5): 6389-6403.
- [38] Chen Y L, Shimizu Y, Tamada J, et al. Optical frequency domain angle measurement in a femtosecond laser autocollimator[J]. Optics Express, 2017, 25(14): 16725-16738.
- [39] Eom T B, Jeong D Y, Kim J W. The small angle generator based on a laser angle interferometer[J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2007, 8(3): 20-23.
- [40] Chen L Y, Lee J Y, Chang H S, et al. Development of an angular displacement measurement by birefringence heterodyne interferometry[J]. Smart Science, 2015, 3(4):

- 188-192.
- [41] 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.
- [42] Jiang H, Yin C Y. Sensitivity enhanced roll angle measurement[J]. *Optical Engineering*, 2000, 39(2): 516-519.
- [43] Liu Z Y, Lin D J, Jiang H, et al. Roll angle interferometer by means of wave plates[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2003, 104(2): 127-131.
- [44] Wu C M, Chuang Y T. Roll angular displacement measurement system with microradian accuracy[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2004, 116(1): 145-149.
- [45] Huang J H, Wang Z, Gao J M, et al. Modeling and analysis of phase fluctuation in a high-precision roll angle measurement based on a heterodyne interferometer[J]. *Sensors*, 2016, 16(8): 1214.
- [46] Tang S Z, Wang Z, Li M, et al. Note: Optimal choice of the reflector by phase analysis for heterodyne interferometric roll angle measurement[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2016, 87(2): 026101.
- [47] Qi J, Wang Z, Huang J H, et al. Note: Enhancing the sensitivity of roll-angle measurement with a novel interferometric configuration based on waveplates and folding mirror[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2016, 87(3): 036106.
- [48] Qi J Y, Wang Z, Huang J H, et al. Resolution-enhanced heterodyne laser interferometer with differential configuration for roll angle measurement[J]. *Optics Express*, 2018, 26(8): 9634-9644.
- [49] Qi J Y, Wang Z, Huang J H, et al. Heterodyne interferometer with two parallel-polarized input beams for high-resolution roll angle measurement[J]. *Optics Express*, 2019, 27(10): 13820-13830.
- [50] 匡翠方, 冯其波, 张斌, 等. 一种新的滚转角测量方法[J]. *光电子·激光*, 2006, 17(4): 468-470.
- Kuang C F, Feng Q B, Zhang B, et al. A novel method for measuring roll[J]. *Journal of Optoelectronics·Laser*, 2006, 17(4): 468-470.
- [51] Plosker E, Bykhovsky D, Arnon S. Evaluation of the estimation accuracy of polarization-based roll angle measurement[J]. *Applied Optics*, 2013, 52(21): 5158-5164.
- [52] Plosker E, Arnon S. Statistics of remote roll angle measurement[J]. *Applied Optics*, 2014, 53(11): 2437-2440.
- [53] Shi E X, Guo J J, Shi E X, et al. Theoretic study on new method for roll angle measurement of machines[C]// 2008 IEEE International Conference on Automation and Logistics, September 1-3, 2008, Qingdao, China. New York: IEEE Press, 2008: 2722-2726.
- [54] Le Y F, Hou W M, Hu K, et al. High-sensitivity roll-angle interferometer[J]. *Optics Letters*, 2013, 38(18): 3600-3603.
- [55] Jin T, Xia G Z, Hou W M, et al. High resolution and stability roll angle measurement method for precision linear displacement stages[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2017, 88(2): 023102.
- [56] Jin T, Ji H, Hou W, et al. Measurement of straightness without Abbe error using an enhanced differential plane mirror interferometer[J]. *Applied Optics*, 2017, 56(3): 607-610.
- [57] Jin T, Han M Y, Liu J L, et al. A heterodyne interferometer for simultaneous measurement of roll and straightness[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 133257-133264.
- [58] Wu S J, Yang J, Li W X, et al. Precision roll angle measurement based on digital speckle pattern interferometry[J]. *Measurement Science and Technology*, 2019, 30(4): 045005.
- [59] 于雪, 刘庆纲, 刘超, 等. 基于泰伯-莫尔效应的滚转角测量方法及其图像处理[J]. *纳米技术与精密工程*, 2017, 15(3): 217-221.
- Yu X, Liu Q G, Liu C, et al. Talbot-moiré effect-based roll angle measurement and its image processing[J]. *Nanotechnology and Precision Engineering*, 2017, 15(3): 217-221.
- [60] 于雪. 基于泰伯莫尔效应的滚转角检测方法的研究[D]. 天津: 天津大学, 2016.
- Yu X. Talbot-Moiré effect method for roll angle measurement[D]. Tianjin: Tianjin University, 2016.
- [61] Tang S Z, Wang Z, Gao J M, et al. Measurement method for roll angular displacement with a high resolution by using diffraction gratings and a heterodyne interferometer[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2014, 85(4): 045110.
- [62] Tang S Z, Li M, Liang H, et al. High-accuracy small roll angle measurement method based on dual-grating diffraction heterodyne interferometer[C]//Proceedings of the 10th Mechanical Engineering Design of Synchrotron Radiation Equipment and Instrumentation, Paris, 2018: 1710233.
- [63] Zhou S Y, Le V, Mi Q G, et al. Grating-corner-cube-based roll angle sensor[J]. *Sensors*, 2020, 20(19): 5524.
- [64] Zhai Y S, Zhang Z F, Su Y L, et al. A high-precision roll angle measurement method[J]. *Optik*, 2015, 126(24): 4837-4840.
- [65] Cai Y D, Yang B H, Fan K C. Robust roll angular error measurement system for precision machines[J]. *Optics Express*, 2019, 27(6): 8027-8036.
- [66] Lee J Y, Chen H Y, Hsu C C, et al. Optical heterodyne grating interferometry for displacement measurement with subnanometric resolution[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2007, 137(1): 185-191.
- [67] Hsieh H L, Lee J Y, Wu W T, et al. Quasi-common-optical-path heterodyne grating interferometer for displacement measurement[J]. *Measurement Science and Technology*, 2010, 21(11): 115304.
- [68] Kimura A, Wei G, Arai Y, et al. Design and construction of a two-degree-of-freedom linear encoder for nanometric measurement of stage position and straightness[J]. *Precision Engineering*, 2010, 34(1): 145-155.

- [69] Li X, Wang H, Ni K, et al. Two-probe optical encoder for absolute positioning of precision stages by using an improved scale grating[J]. *Optics express*, 2016, 24(19): 21378-21391.
- [70] 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.
- [71] Bae E W, Kim J A, Kim S H. Multi-degree-of-freedom displacement measurement system for milli-structures[J]. *Measurement Science and Technology*, 2001, 12(9): 1495-1502.
- [72] Liu C H, Huang H L, Lee H W. Five-degrees-of-freedom diffractive laser encoder[J]. *Applied Optics*, 2009, 48(14): 2767-2777.
- [73] Liu C H, Cheng C H. Development of a grating based multi-degree-of-freedom laser linear encoder using diffracted light[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2012, 181: 87-93.
- [74] Lee C B, Kim G H, Lee S K. Design and construction of a single unit multi-function optical encoder for a six-degree-of-freedom motion error measurement in an ultraprecision linear stage[J]. *Measurement Science and Technology*, 2011, 22(10): 105901.
- [75] 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.
- [76] Kimura A, Gao W, Kim W J, et al. A sub-nanometric three-axis surface encoder with short-period planar gratings for stage motion measurement[J]. *Precision Engineering*, 2012, 36(4): 576-585.
- [77] Gao W, Saito Y, Muto H, et al. A three-axis autocollimator for detection of angular error motions of a precision stage[J]. *CIRP Annals*, 2011, 60(1): 515-518.
- [78] Li X H, Gao W, Muto H, et al. A six-degree-of-freedom surface encoder for precision positioning of a planar motion stage[J]. *Precision Engineering*, 2013, 37(3): 771-781.
- [79] Shimizu Y, Furuta M, Chen Y L, et al. Uncertainty analysis of a six-degree-of-freedom surface encoder for a planar motion stage[J]. *Procedia CIRP*, 2018, 75: 355-360.
- [80] Ishizuka R, Matsukuma H, Shimizu Y, et al. Crosstalk error analysis of a multi-degree-of-freedom surface encoder for a planar motion stage[C]//2018 IEEE International Conference on Advanced Manufacturing, November 16-18, 2018, Yunlin, Taiwan, China. New York: IEEE Press, 2018: 36-39.
- [81] Shimizu Y, Matsukuma H, Gao W. Optical sensors for multi-axis angle and displacement measurement using grating reflectors[J]. *Sensors*, 2019, 19(23): 5289.
- [82] Hsu C C, Chen H, Chiang C W, et al. Dual displacement resolution encoder by integrating single holographic grating sensor and heterodyne interferometry [J]. *Optics Express*, 2017, 25(24): 30189-30202.
- [83] Hsieh H L, Pan S W. Development of a grating-based interferometer for six-degree-of-freedom displacement and angle measurements[J]. *Optics Express*, 2015, 23(3): 2451-2465.
- [84] Hsieh H L, Chen J C, Lerondel G, et al. Two-dimensional displacement measurement by quasi-common-optical-path heterodyne grating interferometer [J]. *Optics Express*, 2011, 19(10): 9770-9782.
- [85] 匡萃方, 冯其波, 刘斌. 角锥棱镜用于激光直线度测量的特性分析[J]. *光学技术*, 2005, 31(2): 282-285.
- Kuang C F, Feng Q B, Liu B. Analyzing characteristic of the cube-corner retroreflector applied to laser straightness measurement[J]. *Optical Technique*, 2005, 31(2): 282-285.
- [86] Fan K C, Chen M J, Huang W M. A six-degree-of-freedom measurement system for the motion accuracy of linear stages[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 1998, 38(3): 155-164.
- [87] RENISAW. XM-60 multi-axis calibrator[EB/OL]. [2022-05-06]. <https://www.renishaw.com/en/xm-60-and-xm-600-multi-axis-calibrator--39258>.
- [88] Angood S M, Kemp C, Chaney R J, et al. Rotation detection kit: US20100053615[P]. 2010-03-04.
- [89] Liang X, Lin J R, Yang L H, et al. Simultaneous measurement of absolute distance and angle based on dispersive interferometry[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2020, 32(8): 449-452.
- [90] Liang X, Lin J R, Wu T F, et al. Absolute angular measurement with optical frequency comb using a dispersive interferometry[J]. *Optics Express*, 2020, 28(24): 36095-36108.
- [91] Liu C H, Jywe W Y, Hsu C C, et al. Development of a laser-based high-precision six-degrees-of-freedom motion errors measuring system for linear stage[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2005, 76(5): 055110.
- [92] Ni J, Wu S M. Laser alignment techniques for simultaneous machine tool geometric error detection[J]. *Proceedings of SPIE*, 1989, 0954: 694-701.
- [93] Yu X Z, Gillmer S R, Woody S C, et al. Development of a compact, fiber-coupled, six degree-of-freedom measurement system for precision linear stage metrology [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2016, 87(6): 065109.
- [94] Yu X Z, Gillmer S R, Ellis J D. Beam geometry, alignment, and wavefront aberration effects on interferometric differential wavefront sensing[J]. *Measurement Science and Technology*, 2015, 26(12): 125203.
- [95] Gillmer S R, Smith R G, Woody S C, et al. Compact fiber-coupled three degree-of-freedom displacement interferometry for nanopositioning stage calibration[J]. *Measurement Science and Technology*, 2014, 25(7): 075205.
- [96] Zhou S Y, Le V, Xiong S L, et al. Dual-comb spectroscopy resolved three-degree-of-freedom sensing [J]. *Photonics Research*, 2021, 9(2): 243-251.
- [97] Coddington I, Swann W C, Nenadovic L, et al. Rapid and precise absolute distance measurements at long range [J]. *Nature Photonics*, 2009, 3(6): 351-356.

- [98] 王国超, 颜树华, 林存宝, 等. 基于飞秒光学频率梳的大尺寸精密测距综述[J]. 光学技术, 2012, 38(6): 670-677.
Wang G C, Yan S H, Lin C B, et al. Overview of large scale precision ranging by femtosecond optical frequency comb[J]. Optical Technique, 2012, 38(6): 670-677.
- [99] API. API XD Laser[EB/OL]. [2022-05-06]. <https://apimetrology.com/>.
- [100] 郭俊康, 李鑫波, 李颀. 导轨五自由度运动误差的光学与倾角传感器组合测量方法[J]. 西安交通大学学报, 2021, 55(2): 64-72.
Guo J K, Li X B, Li X. Five degrees of freedom simultaneous measurement of linear motion system by combination of optical with inclination sensors[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2021, 55(2): 64-72.
- [101] Liu C S, Pu Y F, Chen Y T, et al. Design of a measurement system for simultaneously measuring six-degree-of-freedom geometric errors of a long linear stage[J]. Sensors, 2018, 18(11): 3875.
- [102] Liu C S, Lai J J, Luo Y T. Design of a measurement system for six-degree-of-freedom geometric errors of a linear Guide of a machine tool[J]. Sensors, 2018, 19(1): 5.
- [103] Chang Y H, Liu C S, Cheng C C. Design and characterisation of a fast steering mirror compensation system based on double porro prisms by a screw-ray tracing method[J]. Sensors, 2018, 18(11): 4046.
- [104] Guo Y, Cheng H B, Wen Y F, et al. Three-degree-of-freedom autocollimator based on a combined target reflector[J]. Applied Optics, 2020, 59(8): 2262-2269.
- [105] Cai Y D, Wang L H, Liu Y, et al. Accuracy improvement of linear stages using on-machine geometric error measurement system and error transformation model[J]. Optics Express, 2022, 30(5): 7539-7550.
- [106] Chen B Y, Xu B, Yan L P, et al. Laser straightness interferometer system with rotational error compensation and simultaneous measurement of six degrees of freedom error parameters[J]. Optics Express, 2015, 23(7): 9052-9073.
- [107] Lou Y T, Yan L P, Chen B Y, et al. Laser homodyne straightness interferometer with simultaneous measurement of six degrees of freedom motion errors for precision linear stage metrology[J]. Optics Express, 2017, 25(6): 6805-6821.
- [108] Wang D D, Yang Y Y, Liu D, et al. High-precision technique for *in situ* testing of the PZT scanner based on fringe analysis[J]. Optics Communications, 2010, 283(16): 3115-3121.
- [109] Ge Z T, Takeda M. High-resolution two-dimensional angle measurement technique based on fringe analysis[J]. Applied Optics, 2003, 42(34): 6859-6868.
- [110] Smith R, Fuss F K. Theoretical analysis of interferometer wave front tilt and fringe radiant flux on a rectangular photodetector[J]. Sensors, 2013, 13(9): 11861-11898.
- [111] Chen B Y, Zhang E Z, Yan L P, et al. A laser interferometer for measuring straightness and its position based on heterodyne interferometry[J]. Review of Scientific Instruments, 2009, 80(11): 115113.
- [112] Yang L G, Wang X Z, Long L L. Measurement method of multi-degree-freedom based on laser collimation principle[J]. Proceedings of SPIE, 2010, 7656: 765669.
- [113] Fan K C, Chen M J. A 6-degree-of-freedom measurement system for the accuracy of X-Y stages[J]. Precision Engineering, 2000, 24(1): 15-23.
- [114] Lee S W, Mayor R, Ni J. Development of a six-degree-of-freedom geometric error measurement system for a meso-scale machine tool[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2005, 127(4): 857-865.
- [115] Wang W, Kweon S H, Hwang C S, et al. Development of an optical measuring system for integrated geometric errors of a three-axis miniaturized machine tool[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2009, 43(7): 701-709.
- [116] Chen Y T, Lin W C, Liu C S. Design and experimental verification of novel six-degree-of freedom geometric error measurement system for linear stage[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2017, 92: 94-104.
- [117] 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.
- [118] 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(12/13): 1978-1987.
- [119] 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, 2009, 58(1): 477-480.
- [120] 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.
- [121] 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.
- [122] Feng Q B, Zhang B, Cui C X, et al. Development of a simple system for simultaneously measuring 6DOF geometric motion errors of a linear guide[J]. Optics Express, 2013, 21(22): 25805-25819.
- [123] Gao S, Zhang B, Feng Q B, et al. Errors crosstalk analysis and compensation in the simultaneous measuring system for five-degree-of-freedom geometric error[J]. Applied Optics, 2015, 54(3): 458-466.
- [124] Cui C X, Feng Q B, Zhang B, et al. System for simultaneously measuring 6DOF geometric motion errors using a polarization maintaining fiber-coupled dual-frequency laser[J]. Optics Express, 2016, 24(6): 6735-6748.

- [125] Zhao Y Q, Zhang B, Feng Q B. Measurement system and model for simultaneously measuring 6DOF geometric errors[J]. Optics Express, 2017, 25(18): 20993-21007.
- [126] Jia P Z, Zhang B, Feng Q B, et al. Simultaneous measurement of 6DOF motion errors of linear guides of CNC machine tools using different modes[J]. Sensors, 2020, 20(12): 3439.
- [127] Jia P Z, Zhang B, Zheng F J, et al. Comprehensive measurement model of geometric errors for three linear axes of computer numerical control machine tools[J]. Measurement Science and Technology, 2022, 33(1): 015202.
- [128] Zheng F J, Feng Q B, Zhang B, et al. A high-precision laser method for directly and quickly measuring 21 geometric motion errors of three linear axes of computer numerical control machine tools[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 109(5): 1285-1296.
- [129] Bao C C, Feng Q B, Li J K. Simultaneous measurement method and error analysis of the six degrees-of-freedom motion errors of a rotary axis[J]. Applied Sciences, 2018, 8(11): 2232.
- [130] Li J K, Feng Q B, Bao C C, et al. Method for simultaneous measurement of five DOF motion errors of a rotary axis using a single-mode fiber-coupled laser[J]. Optics Express, 2018, 26(3): 2535-2545.
- [131] Zheng F J, Feng Q B, Zhang B, et al. A method for simultaneously measuring 6DOF geometric motion errors of linear and rotary axes using lasers[J]. Sensors, 2019, 19(8): 1764.