

## 基于组合面型基准件的多参数测量方法

李杏华, 邢艳蕾\*, 房丰洲, 刘培露, 苏智琨

(天津大学 精密测试技术及仪器国家重点实验室, 天津 300072)

**摘要:** 针对运动物体空间多维位姿检测过程繁琐、设备笨重及昂贵等问题, 提出了一种可以完成运动体 4 个参数同时测量的光学非接触测量方法。该系统由旋转抛物面与平面构成的组合面型基准件和光学测头两部分组成。基于平面镜反射原理和组合面型基准件的面型特征, 分别建立了运动轴的俯仰角、偏摆角和二维位移的角度测量模型, 并完成了系统的精度评价与重复性实验。实验结果表明: 该系统的测角精度为 1.5", 位移精度为 1  $\mu\text{m}$ , 为机床误差辨识打下了基础。

**关键词:** 组合面型; 俯仰角; 偏摆角; 二维位移

中图分类号: TH741 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201847.0717001

## Multi-parameter measurement method based on combined surface reference

Li Xinghua, Xing Yanlei\*, Fang Fengzhou, Liu Peilu, Su Zhikun

(State Key Laboratory of Precision Measuring Technology and Instrument, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

**Abstract:** In order to solve the problems of complicated process, bulky and expensive apparatuses in multi-dimensional position detection of a moving body, an optical non-contact measurement method of simultaneously measuring four parameters of a moving object was proposed. The system consisted of a combined surface reference composed of a rotating paraboloid and a plane, and an optical probe. Based on the principle of plane mirror reflection and the features of combined surface reference, the angle measurement models of the pitch angle, the yaw angle and the two-dimensional displacements of the moving object were established respectively, and the accuracy evaluation and the repeatability experiments of the system were completed. The experimental results show that the angle accuracy of the system is 1.5", and the displacement accuracy is 1  $\mu\text{m}$ , laying a foundation for the error identification of machine tools.

**Key words:** combined surface; pitch angle; yaw angle; two-dimensional displacement

收稿日期: 2018-02-05; 修订日期: 2018-03-15

基金项目: 国家自然科学基金(51375338)

作者简介: 李杏华(1976-), 男, 副教授, 硕士生导师, 博士, 主要从事测试及信息处理技术方面的研究。Email: li.xinghua@126.com

通讯作者: 邢艳蕾(1992-), 女, 硕士生, 主要从事基于光学自由曲面的机床误差检测的传感器方面的研究。Email: xingyanleitju@126.com

## 0 引言

高速、高效、高精度、高可靠性是数控机床发展的主要趋势,而精度是其最高价值的体现,是所有机床追求的最高目标。正常投入使用的机床工作一定时间后会处于超性能工作状态,为了保证零件的加工精度、最大程度提高机床的利用率、延长机床的寿命,需要定期对机床进行周期性精度检测与误差补偿,因此如何快速、高效地对机床误差进行辨识与补偿已成为亟待解决的问题。

机床精度<sup>[1]</sup>的检测主要是定位精度的检测,目前常用的检测仪器有激光干涉仪和球杆仪等。激光干涉仪<sup>[2]</sup>一次测量只能获取一个参数信息,操作要求高、设备昂贵;球杆仪<sup>[3]</sup>无法随意规划测量路径,为旋转轴误差辨识的测量步骤设计和理论解耦算法研究增加了难度,且球杆仪以磁力座配合精密球进行接触式测量,需要在低速下运动以保证测量精度,很难适应快速化趋势;一维球列<sup>[4]</sup>适合各轴的直线标定,但对角度误差检测不具优势。随着自由曲面技术的快速发展,天津大学房丰洲<sup>[5-9]</sup>课题组、东京大学学者 Gao W<sup>[10-12]</sup>等均应用光学自由曲面对多轴系统的位姿信息获取进行了探索。

运动轴的位移与转角信息作为机床几何误差检测的直接或间接参数,其测量过程的繁简程度直接决定机床误差校准的时间。为了测量上述参数,文中提出了一种以旋转抛物面与平面的组合面型作为测量基准件,配合设计的光学测头,通过成像光斑位置的变化获取运动体二维位移与转角 4 个参数的方法,为机床几何误差检测提供基础。

## 1 测量原理

二维转角与位移的测量原理如图 1 所示,系统分为光学测头和基准件两部分。基准件为平面与旋转抛物面两种面型的组合。

测量过程中,光学测头随运动体运动,基准件保持固定,当测量光束位于平面位置处时,根据 CCD 中光斑的位置可以获得运动体的俯仰角与偏摆角;当测量光束位于旋转抛物面上时,根据自准直原理及 CCD 中的光斑位置则可以获得运动体的二维位移信息。

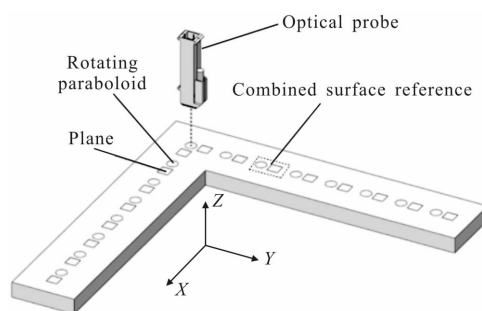


图 1 系统测量原理图

Fig.1 Measurement schematic of system

单个组合面型有效测量范围较小,故可根据实际测量需要将组合面型设计为阵列形式,以实现任意量程的测量。

以下实验均以沿 X 轴方向运动为例进行说明。

### 1.1 角度测量原理

转角的测量原理如图 2 所示,光学测头由激光器、反射镜、分光棱镜(BS)、成像透镜和 CCD 组成。激光完成准直缩束后入射到反射镜上,反射光经分光棱镜反射至基准件上,被基准件反射的光束经分光棱镜透射后通过成像透镜投射到 CCD 上,成像光斑的位置和被测点处的倾斜角有一一对应的关系,通过该原理即可实现角度的测量。

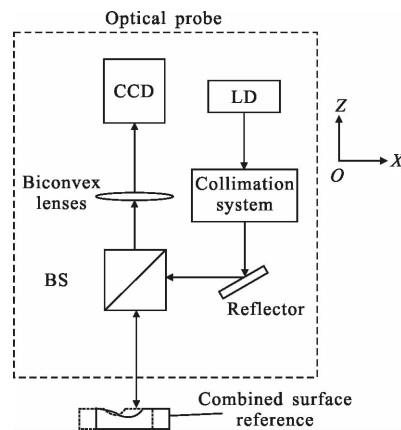


图 2 测量原理图

Fig.2 Measurement schematic

测量点位于平面上时,运动体带动光学测头在移动过程中发生转动,光束与该法线间的角度会改变,变化的角度即为运动物体绕 Z 轴的俯仰角  $\varepsilon_z(x)$  和绕 Y 轴的偏摆角  $\varepsilon_y(x)$ 。

XOZ 平面内,实际光束与 Z 轴方向存在倾斜角  $\alpha$ ,如图 3 所示,光斑在 CCD 中的位置与角度之间的

三角函数可表示为:

$$\tan(2\varepsilon_y(x)+2\alpha_x)=\frac{s_{1x}}{f} \quad (1)$$

$$\tan(2\alpha_x)=\frac{s_{0x}}{f} \quad (2)$$

式中:  $\varepsilon_y(x)$  为运动导轨绕  $Y$  轴的偏摆角;  $\alpha_x$  为初始时刻光束与基准件的法线在  $X$  方向的夹角;  $s_{0x}$  为初始时刻成像光斑的中心距离光轴在  $X$  方向的距离;  $s_{1x}$  为测量点成像光斑的中心距离光轴在  $X$  方向的距离;  $f$  为成像透镜的焦距。

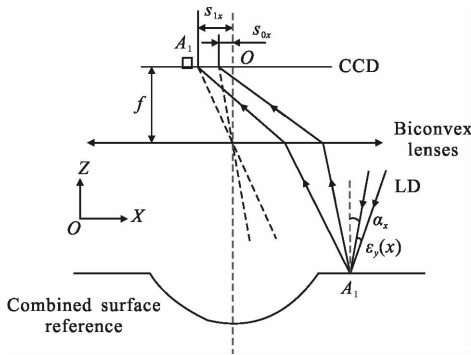


图 3 二维转角测量原理图

Fig.3 Measurement schematic of two-dimensional angle

则可得运动体绕  $Y$  方向的偏摆角:

$$\varepsilon_y(x)=(\arctan(s_{1x}/f)-2\alpha_x)/2 \quad (3)$$

同理可得运动体绕  $Z$  方向的俯仰角:

$$\varepsilon_z(x)=(\arctan(s_{1y}/f)-2\alpha_y)/2 \quad (4)$$

式中:  $s_{1y}$  为测量点成像光斑的中心距离光轴在  $Y$  方向的距离;  $\alpha_y$  为初始时刻光束与基准件的法线在  $Y$  方向的夹角。

### 1.2 位移测量原理

测量点位于旋转抛物面上时,如图 4 所示,以角度测量为基础,反射光束经成像透镜后聚焦到 CCD 上。

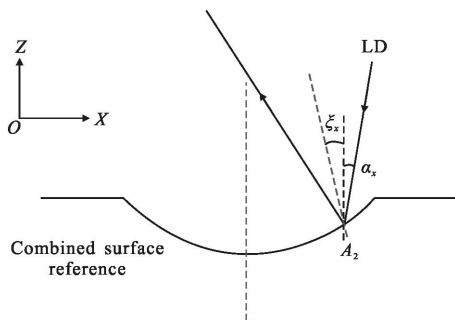


图 4 二维位移测量原理图

Fig.4 Measurement schematic of two-dimensional displacement

旋转抛物面的面型公式为:

$$\frac{x^2}{a^2}+\frac{y^2}{a^2}=2z \quad (5)$$

式中:  $a^2$  代表旋转抛物面的特征参数;  $x, y, z$  代表旋转抛物面上点的三维信息。

根据公式(5)可知,  $XOZ$  平面、 $YOZ$  平面内抛物面上任意一点切线的斜率为:

$$\tan(\xi_x)=\frac{\partial z}{\partial x}=\frac{x}{a^2} \quad (6)$$

$$\tan(\xi_y)=\frac{\partial z}{\partial y}=\frac{y}{a^2} \quad (7)$$

式中:  $\xi_x$  为旋转抛物面上测量点切线的法线与基准件法线在  $X$  轴方向的夹角;  $\xi_y$  为旋转抛物面上测量点切线的法线与基准件法线在  $Y$  轴方向的夹角; 由公式(6)、(7)可知, 旋转抛物面上各点的位置坐标与其斜率有一一对应的线性关系。可得测量点  $A_2$  处的坐标为:

$$x=a^2\tan(\xi_x) \quad (8)$$

$$y=a^2\tan(\xi_y) \quad (9)$$

通过公式(5)、(8)、(9)可以求得旋转抛物面上任意一点的坐标。当选择不同的测量点时, 则可根据两个测量点的坐标求取运动体此时在  $XY$  两个方向上的位移量:

$$S_x=a^2\tan(\xi_{xi})-a^2\tan(\xi_{yj}) \quad (10)$$

$$S_y=a^2\tan(\xi_{yi})-a^2\tan(\xi_{xj}) \quad (11)$$

式中:  $i, j$  代表测量的不同点;  $S_x, S_y$  为测量点间的距离;  $\xi_{xi}, \xi_{yi}, \xi_{xj}, \xi_{yj}$  分别为不同测量点处切线的法线与基准件的法线在  $XY$  两个方向所对应的夹角, 可以通过公式(1)、(2)获得。

## 2 实验及结果分析

为了对所设计系统的原理可行性进行验证, 将电动三维位移台作为测量平台, 光学测头安装在  $Z$  向导轨上, 驱动器控制三维位移台的  $X$  导轨单向运动。CCD 中成像光斑的中心采用以灰度值为加权值的重心法, 精密电动台驱动 CCD 以  $10 \mu\text{m}$  步长在单方向连续运动 5 次, 得到的位移精度优于  $0.4 \text{ Pix}$ 。以单个基准件为例进行如下实验。

### 2.1 重复性实验

对于运动导轨的俯仰角与偏摆角的测量示意图见图 5, 运动导轨带动测头沿  $X$  方向以  $100 \mu\text{m}$  步长

运动, 光束在平面部分进行测量, 记录成像光斑在 CCD 中的位置坐标, 根据公式(3)、(4)可以求得运动导轨的俯仰角  $\varepsilon_y(x)$  与偏摆角  $\varepsilon_z(x)$ , 将其在整个量程范围内重复实验三次, 测量结果如图 6 所示。

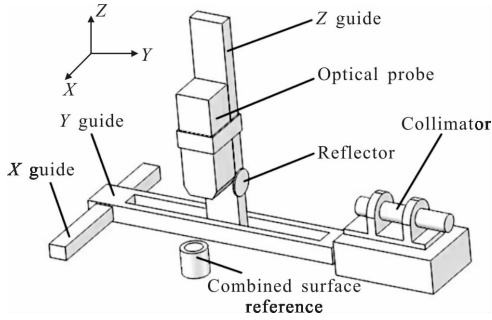
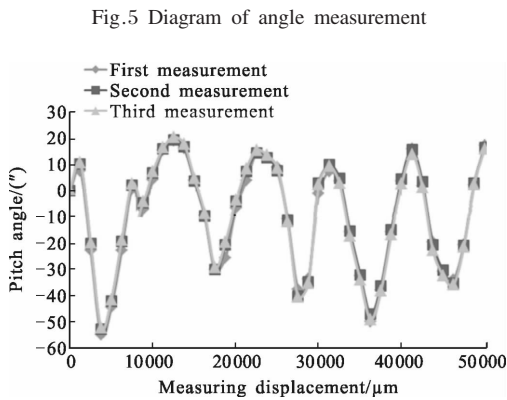
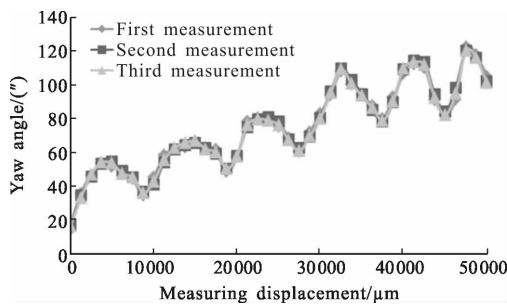


图 5 角度测量示意图



(a) 俯仰角  $\varepsilon_z(x)$  的重复性实验

(a) Repetitive experiment of pitch angle  $\varepsilon_z(x)$



(b) 偏摆角  $\varepsilon_y(x)$  的重复性实验

(b) Repetitive experiment of yaw angle  $\varepsilon_y(x)$

图 6 光学测头角度测量重复性实验

Fig.6 Repetitive experiment of optical probe for angle measurement

对于位移测量, 如图 7 所示, 组合面型基准件放置在 PI 位移台上, 初始时刻光学测头中的光束入射到基准件的曲面部分, 驱动程序控制 PI 位移台以  $30 \mu\text{m}$  的步长沿 X 方向单向运动, 记录成像光斑在

CCD 中的位置坐标, 由公式(10)、(11)将其值转换为位移量  $S_i(i=y, z)$ , 重复实验三次得到图 8 的测量结果。

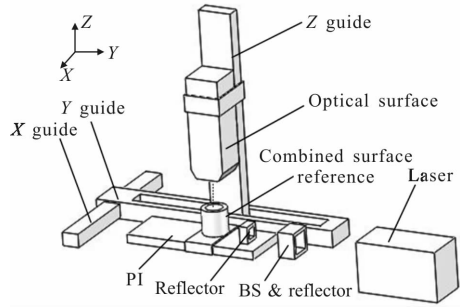
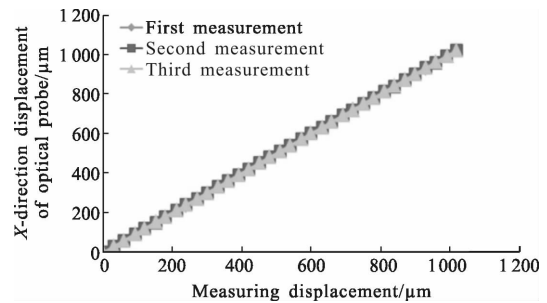


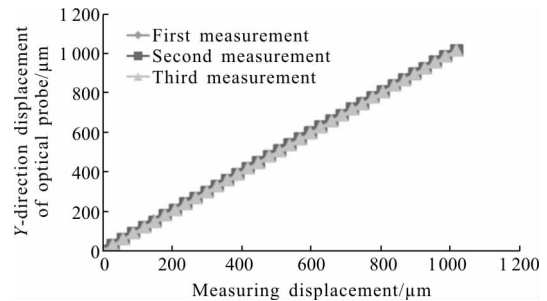
图 7 位移测量示意图

Fig.7 Diagram of displacement measurement



(a) X 方向位移重复性实验

(a) Repeatability experiment of X-direction displacement



(b) Y 方向位移重复性实验

(b) Repetitive experiment of Y-direction displacement

图 8 光学测头位移测量重复性实验

Fig.8 Repetitive experiment of optical probe for displacement measurement

由图 7 和图 8 可知, 该系统的角度测量与位移测量均有较好的重复性。

### 2.2 精度对比实验

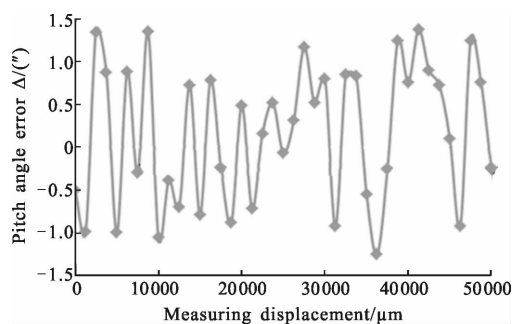
系统测角精度的对比选用精度为  $0.1''$  的准直仪作为参考基准, 运动过程中在同一个测量位置, 准直仪中的光束投射到平面反射镜上, 测头中的光束投



射到基准件的平面位置, 分别记录准直仪中的角度值与测头中成像光斑的位置坐标对应的角度。将测头中角度值与准直仪示数  $\theta$  进行比较, 结果如图 9 所示。

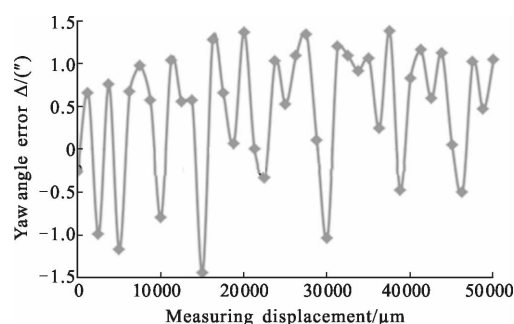
角度测量误差定义为:

$$\Delta = \varepsilon_{i(i=y,z)}(x) - \theta \quad (12)$$



(a)  $\varepsilon_i(x)$  的角度对比误差

(a) Angle comparison error of  $\varepsilon_i(x)$



(b)  $\varepsilon_j(x)$  的角度对比误差

(b) Angle comparison error of  $\varepsilon_j(x)$

图 9 光学测头与准直仪角度测量对比结果

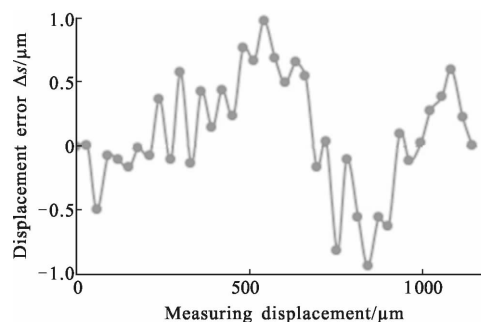
Fig.9 Comparison results of the collimator with optical probe in angle measurement

由图 9 所示的误差曲线图可知, 在单个组合面型的平面测量范围内, 准直仪中的数据与光学测头中的数据的数据的偏摆角误差与俯仰角误差  $\Delta$  均在  $\pm 1.5''$  以内。安装过程中, CCD 坐标系与三维位移台坐标系二者间存在微小的旋转关系, 通过标定将此误差进行了补偿。

位移的测量精度实验以雷尼绍激光干涉仪示数为基准, 将光学测头的测量位移  $s$  与激光干涉仪位移量  $s_0$  进行比较, 得到误差曲线如图 10 所示。

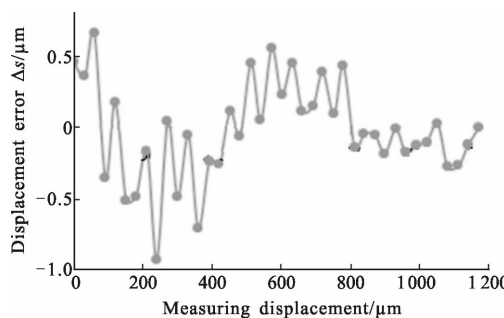
位移测量误差定义为:

$$\Delta_s = s - s_0 \quad (13)$$



(a) X 轴位移误差

(a) Displacement error of X-axis



(b) Y 轴位移误差

(b) Displacement error of Y-axis

图 10 光学测头与激光干涉仪位移测量对比结果

Fig.10 Comparison results of the optical probe with laser interferent in displacement measurement

测量过程中, 由于 CCD 安装误差及 PI 台摆放位置误差的存在, 两坐标系间存在旋转关系, 通过旋转矩阵可以对该误差进行补偿; 同时 PI 位移台运动过程中受丝杠影响, 实际值与所设定的步长存在误差, 故采用了更高精度的激光干涉仪示数作为参考基准, 将补偿后的值作为测量真值。综合考虑上述误差后, 由图 10 可知, XY 两个方向的位移测量误差均分布在  $\pm 1 \mu\text{m}$  范围内。

### 2.3 误差分析

图 9 与图 10 的测量结果表示了设计的测量系统与参考仪器间的偏差, 该偏差主要来自以下几个方面: (1) 测头部分: 激光器光束自身的发散角带来的误差  $\Delta 1$ , CCD 像素畸变引入的误差  $\Delta 2$ ; 测头中卡固光学器件的槽的加工误差  $\Delta 3$ ; 选用的光学器件自身的加工误差  $\Delta 4$ ; (2) 加工的组合面型基准件的面型误差  $\Delta 5$ 、粗糙度误差  $\Delta 6$ ; (3) 光斑中心定位精度不足引入的误差  $\Delta 7$ 。目前该系统处于探索阶段, 对一些误差的认识存在一些不足, 随着课题的深入, 将

会对各误差源进行逐一分析, 尽可能补偿以提高系统的精度。

### 3 结 论

该系统以设计的光学测头作为测量传感器, 采用平面反射镜与旋转抛物面组合面型作为测量基准件完成了对运动导轨小范围内多参数同时检测的实验。现探索阶段位移测量精度为  $1\ \mu\text{m}$ , 角度测量精度为  $1.5''$ , 虽无法达到激光干涉仪测量精度, 但避免了激光干涉仪测量镜组多次安装、调节的繁琐步骤, 在精度要求不严格的场合有一定的测量优势。后续工作中将深入研究采用 L 型阵列基准件在测量角度与直线度方面的应用, 并探索不同面型的组合方式及组合面型阵列的不同排列方式, 为机床几何误差检测探索新的方法。

#### 参考文献:

- [1] Du Zhengchun, Yang Jianguo, Feng Qibo. Status and trend of geometric error measurement of CNC machine tools [J]. *Aircraft Manufacturing Technology*, 2017, 525(6): 34–44. (in Chinese)  
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, 525(6): 34–44.
- [2] Gan Bin, Liu Yang, Zhao Yu. An error identification of NC machine tools based on laser Doppler [J]. *Journal of Chongqing University of Technology*, 2013, 27 (3): 56–59. (in Chinese)  
甘彬, 刘洋, 赵宇. 基于激光多普勒仪的数控机床误差辨识[J]. 重庆理工大学学报, 2013, 27(3): 56–59.
- [3] Feng Zhiming, Yin Guofu. Research on spatial error modeling and detection method of NC machine tool based on ballbar [J]. *Journal of Xihua University: Natural Science Edition*, 2014, 33(4): 20–23. (in Chinese)  
封志明, 殷国富. 基于球杆仪的数控机床空间误差建模与检测方法研究 [J]. 西华大学学报: 自然科学版, 2014, 33(4): 20–23.
- [4] Li Shuhe, Zhang Guoxiong, Zhang Yiqun. Application of one-dimensional ball in the error detection of NC machine tools [J]. *Aviation Precision Manufacturing Technology*, 1996, 32(5): 33–36. (in Chinese)  
李书和, 张国雄, 张奕群. 一维球列在数控机床误差检测中的应用[J]. 航空精密制造技术, 1996, 32(5): 33–36.
- [5] Zhang X D, Wang Q C, Fang F Z, et al. Controllable fabrication of freeform optics [J]. *International Journal of Precision Technology*, 2013, 3(3): 277–289.
- [6] Fang F Z, Zhang X D, Weckenmann A, et al. Manufacturing and measurement of freeform optics [J]. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 2013, 62(2): 823–846.
- [7] Fang F, Cheng Y, Zhang X. Design of free-form optics [J]. *Advanced Optical Technologies*, 2013, 2(5): 445–453.
- [8] Fang F Z, Zhang X D, Hu X T. Cylindrical coordinate machining of optical freeform surfaces [J]. *Optics Express*, 2008, 16(10): 7323–7329.
- [9] Fang Fengzhou, Wan Yu, Zhu Pengzhe, et al. Dimensional displacement measurement system based on optical free surface [J]. *Journal of Tianjin University*, 2014, 47 (10): 934–942. (in Chinese)  
房丰洲, 万宇, 朱朋哲, 等. 基于光学自由曲面的三维位移测量系统[J]. 天津大学学报, 2014, 47(10): 934–942.
- [10] Shimizu Y, Tan S L, Murata D, et al. Ultra-sensitive angle sensor based on laser auto-collimation for measurement of stage tilt motions [J]. *Optics Express*, 2016, 24(3): 2788–2805.
- [11] Gao W, Kimura A. A three-axis displacement sensor with nanometric resolution [J]. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 2007, 56(1): 529–532.
- [12] Gao W, Saito Y, Sato H, et al. Development of a sensitive two-axis micro-angle sensor [J]. *Journal of the Japan Society for Precision Engineering Contributed Papers*, 2006, 72(9): 1174–1178.