

文章编号 1004-924X(2015)09-2620-07

光学自由曲面快速刀具伺服车削误差的补偿

吴庆玲*

(吉林交通职业技术学院, 吉林 长春 130012)

摘要:受各种误差因素以及周期性变化的切削力的影响,快速刀具伺服金刚石车削技术往往难以用一次车削获得满足光学性能要求的自由曲面。本文提出了一种利用线性差动传感器(LVDT)实现高精度接触式自由曲面在位测量的方法。该方法结合两自由度快速刀具伺服系统,实现了基于快速刀具伺服(FTS)的自由曲面车削加工的误差补偿。试验结果表明,该技术将自由曲面的加工精度提高了 20%,表面粗糙度降低 18.1%,解决了 FTS 系统与机床运动的同步问题,可补偿机床 xyz 三向运动误差,可用于自由曲面加工误差的修正。该方法还可用于不对称幅度较大的曲面或硬脆性材料的加工等,故促进了高精度光学自由曲面的推广应用。

关键词:光学自由曲面;快速刀具伺服;金刚石车削;加工误差;在位测量;误差补偿

中图分类号:TH161.1 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20152309.2620

Error compensation of optical freeform surfaces in fast tool servo diamond turning

WU Qing-ling*

(Jilin Communications Polytechnic, Changchun 130012, China)

* Corresponding author, E-mail: wuqlsmile@163.com

Abstract: Fast Tool Servo (FTS) diamond turning technology usually can not obtain satisfactory optical freeform surfaces by one-step turning because many error factors will drop the fabrication accuracy of freeform surfaces. Therefore, a higher precise contact in-side measuring method for freeform surfaces was proposed by using a Linear Variable Differential Transformer (LVDT). By combination with a two DOF fast tool servo system, the error compensation technology for optical freeform surfaces machined by fast tool servo diamond turning was implemented to enhance the fabrication accuracy. The experiment results show that the form accuracy has improved by 20% and surface roughness decreased by 18.1% with the proposed error compensation technology. This technology solves the synchronization between FTS system and tool movement, compensates movement errors in xyz directions of the machine tool and can be used in correction of the machining errors of freeform surfaces. Moreover, it can be used to cut the large asymmetry surfaces and brittle materials, so that promotes the applications of high precision freeform surfaces.

Key words: optical freeform surface; fast tool servo; diamond turning; machining error; in-sit measurement; error compensation

收稿日期:2015-05-18;修订日期:2015-07-16.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 51175221);吉林省科技攻关项目(No. 20130522155JH)

1 引言

自由曲面光学零件可以大幅度改善光学性能、提高光学利用率、简化光学系统,在航空航天、军事国防、光电通信、生化医疗以及能源等领域有大量的应用需求^[1-3],在全球形成了价值数十亿美元的市场,并呈逐年递增趋势,所以目前光学自由曲面的超精密加工已成为研究热点之一^[4-5]。基于快速刀具伺服(Fast Tool Servo, FTS)的金刚石车削技术因具有高效率、高精度的特点而受到学术界和工程界的广泛关注,美国、日本、德国以及国内多家单位先后在这方面展开研究,并取得了一定的成果^[5-9]。Ametek Precitech、Moore Nanotechnology System、Kinetic Ceramics 等公司先后推出了商品化的单自由度 FTS 系统。

加工光学零件时,FTS 装置带动刀具沿着 z 向快速往复移动,与机床的进给运动和主轴转动相结合,一次走刀就可在获得高精度的各种复杂曲面。刀具的高速往复运动可以使主轴具有较高的转速,从而获得高精度、高效率^[6]。然而,由于自由曲面面形的不断变化,刀具的车削深度和切削力也实时发生变化,从而造成车削过程不稳定而影响加工精度。另外,机床的运动误差、机床与 FTS 系统之间的协调误差都会使工件产生加工误差^[9-10]。由此产生的自由曲面的面形误差往往难以直接修正,其难点在于:自由曲面的误差补偿需要从第一次车削时的初始车削点或者特定的已知点开始,否则会由于两次车削曲面存在错位现象而严重破坏曲面。针对这一问题, Kim 提出了一种伪在线测量误差补偿加工方法,通过多次车削在位测量回转曲面,得出机床误差情况,并在自由曲面车削中对这部分误差进行补偿,从而提高加工精度^[8]。鉴于慢速伺服技术可以准确地记录刀具的初始车削点位置,并可以实时调节主轴的转角位置和刀具进给位置,故其可以实现自由曲面的误差补偿加工。国防科技大学的关朝亮等人采用慢速伺服车削对自由曲面进行多次车削,大大地提高了加工精度^[10],其不足在于会进一步延长慢速伺服技术的加工时间。

FTS 车削技术中,FTS 系统和数控机床是两套独立的工作系统,二者通过主轴的编码器实现工作协调。现有的单自由度 FTS 还无法在加工过程中保证主轴的转角位置、刀具的 z 向位置和 x 向位置在某一时刻准确到达指定位置,也就是无法准确保证三者之间的相对位置关系,故其难以实现自由曲面的误差补偿车削加工。目前,尚未见有关于 FTS 车削加工实现多次车削的报道。

误差补偿车削加工主要包括两个方面:自由曲面的在位测量和误差补偿车削加工。本文采用一种简单方便的在位测量技术获取自由曲面的加工误差,并利用两自由度 FTS 系统,通过主轴编码器和 x 向导轨光栅尺,建立了 FTS 系统在 x 向和 z 向的位移与主轴转角之间的关系,以此确保刀具的 x 向和 z 向位置与机床运动的高度同步,实现光学自由曲面的误差补偿车削加工。

2 FTS 误差补偿车削加工技术原理

FTS 误差补偿车削加工的原理如图 1 所示,其主要步骤如下:①利用 LVDT 实现自由曲面的接触式在位测量;②对测量数据点进行平滑滤波处理,并根据每个测量点对应的 x 轴坐标和主轴转角将测量点表示到柱坐标系下;③采用 Zernike 多项式对离散点进行曲面拟合,并采用协方差矩阵法求解矛盾方程,得出测量曲面的 Zernike 多项式。采用 Zernike 多项式法的意义在于可以根据 Zernike 多项式的系数分析特定误差源^[6],进行球面补偿时方便测头计算补偿量;④由于 LVDT 的测头为球形,需要对测量的数据进行球面半径补偿,也就是等距面的求解;⑤球面半径补偿后,可以得出被加工曲面的实际测量曲面,通过对测量曲面进行平移、旋转等坐标变化从而实现曲面匹配,使其与原理想曲面尽可能重合;⑥将测量曲面和理想曲面进行对比,得出加工曲面误差,将该误差值在初始车削路径中进行补偿,并考虑金刚石刀尖圆弧半径的影响;⑦利用两自由度 FTS 系统快速准确地调整刀具在 x 向和 z 向的位置,使其与主轴转角保持高精度同步,精确地从初始车削点进行误差补偿加工;⑧对二次车削后的自由曲面进行测量与误差分析。

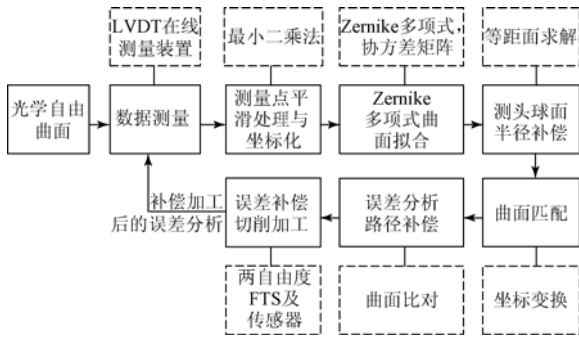


图 1 自由曲面 FTS 金刚石车削误差补偿加工原理
Fig. 1 Error compensation principle of FTS diamond turning for freeform surfaces

3 自由曲面的在位测量

利用 LVDT 的自由曲面在位测量主要包括：测量装置的设计、制作和安装，测量数据的处理，误差分析。主要仪器设备如图 2 和图 3 所示，包括精密数控车床、主轴光电编码器、两自由度 FTS 装置、LVDT 测量装置和 x 向直线光栅。



图 2 主轴光电编码器
Fig. 2 Spindle encoder

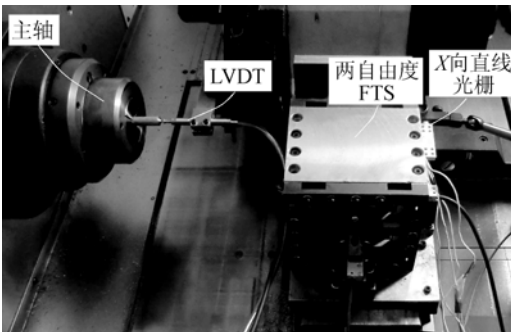


图 3 FTS 车削及测量设备
Fig. 3 FTS system and measurement device

斜平面在车削加工中是一种最为典型的非回

转对称曲面，而且面形简单、易加工检测，常被用于 FTS 加工性能的检验^[15-16]。所以本文也采用一个斜平面来验证在位测量方法和加工误差对于自由曲面的补偿车削效果。

3.1 测试装置的调试

为保证 LVDT 能测量整个曲面，以及确定每个测量点在工件坐标系中的准确位置，必须调整 LVDT 测头的中心位置，使其在 y 向上对准主轴中心， x 向和 z 向有确定的坐标位置。自行设计了一带有开口槽的刀杆用于安装 LVDT，如图 4 所示，在开口槽处利用螺栓锁紧固定 LVDT。由于难以调整机床垂直方向高度，考虑将刀杆的固定端底面做成斜面，可以根据楔形块原理调整 LVDT 高度。本文在主轴上装夹一球头工件，用于调节 LVDT 以搜寻工件最高点，从而确定 LVDT 的测头位置。

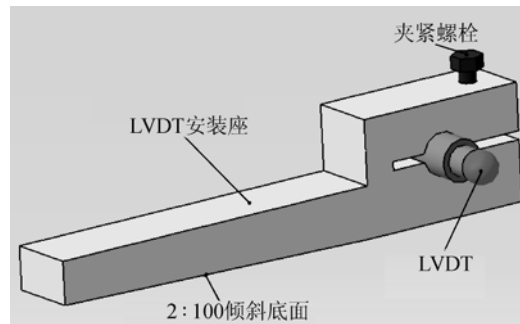


图 4 LVDT 夹具示意图
Fig. 4 Clamping device of LVDT

本文采用阿美特克公司的轻触型气动 LVDT，最大限度地减小测头与被测量曲面间的接触力，从而减小测头的磨损和变形，提高测量准确度。其主要数据如表 1 所示，探头采用直径为 3 mm 的尼龙球头。

表 1 LVDT 性能参数

Tab. 1 LVDT performance parameters

测量 量程/mm	重复性 / μm	接触力	分辨率 / μm	精度 (读数的%)
2	0.15	0.18 N@0.03 bar	<0.05	0.05

3.2 数据测量及处理

利用 FTS 加工的一个斜平面为样件，工件半径为 10 mm，斜面部分半径为 5 mm，斜面的 P-V 高度差为 0.1 mm，如图 5 所示。LVDT 按照类

似于自由曲面车削的方式扫描工件表面,此时准确记录 LVDT、主轴转角和 x 向光栅尺的数值,也就是每个测量点的转角位置、 x 向和 z 向位置。测试过程中,LVDT 与被检测面的接触力要尽可能的小。机床主要运动参数如下:主轴转速为 10 r/min, x 向进给量为 $25 \mu\text{m}/\text{r}$ 。斜平面对应的刀具轨迹每转只有一个周期,面形变化趋势平缓,测量点数取每转 60 点即可,LVDT 的采样时间为 0.1 s,LVDT 的供气气压为 3 kPa。

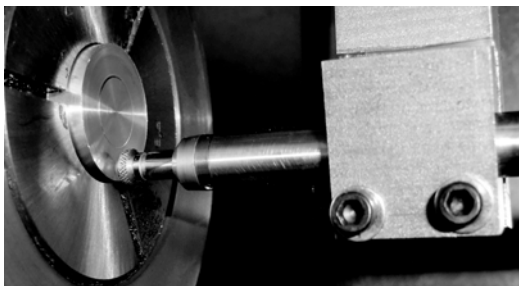


图 5 LVDT 测量斜平面

Fig. 5 Measurement of tilted surface by LVDT

将 LVDT 的测量数据进行滤波处理并坐标化,如图 6 中螺旋线所示。对数据进行曲面拟合得出 Zernike 多项式^[11-15],求出等距面,实际测量斜面如图 8 所示,并作出理想曲面的车削点路径作为比较,可以大致看出曲面误差的分布情况。

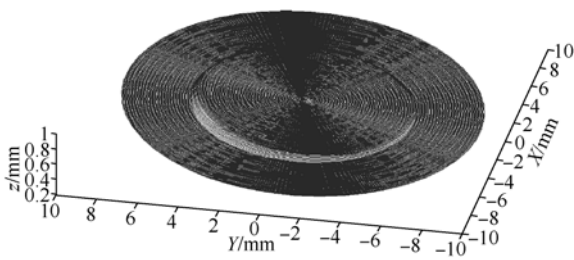


图 6 LVDT 测量曲面数据点

Fig. 6 Measured points of tilted surface by LVDT

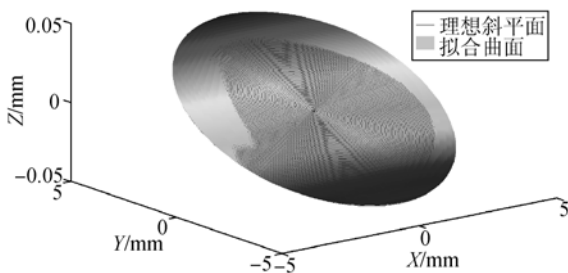
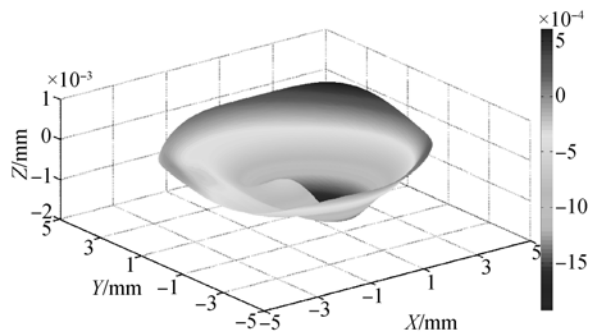


图 7 Zernike 多项式拟合的斜面

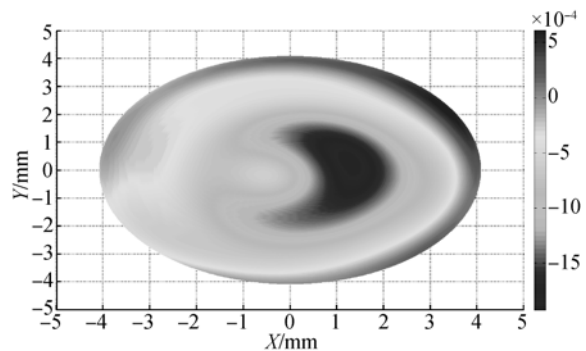
Fig. 7 Tilted surface fitted by Zernike polynomial

拟合的斜面与实际斜面相比较可得出误差分布如图 8 所示。斜平面的 PV(Peak to Valley)误差值达到 $2.5 \mu\text{m}$,越往中心处的误差越大。分析其原因,主要有以下几个方面:车削深度大,切削力大且呈周期性变化,而且,随着车削速度降低,切削力变大,造成 FTS 出现一定的运动误差;机床主轴的径向跳动和轴向跳动;导轨工作的非线性因素等。斜平面的表面粗糙度采用 OLS3000 激光共聚焦显微镜测量,表面粗糙度值为 $R_a=44 \text{ nm}$ 。



(a)斜平面误差

(a) Profile error of tilted surface



(b)斜平面误差平面分布图

(b) Planar distribution of tilted surface errors

图 8 斜平面误差分布图

Fig. 8 Error distribution of tilted surfaces

4 自由曲面误差补偿加工

4.1 工作原理

FTS 安装到数控机床上后,可以确定金刚石刀具在机床坐标系中的位置,也就是刀具的 x 和 z 向坐标位置;主轴(C 轴)后端安装有光电编码器,用于提供主轴的转角信号。为了实现自由曲面的二次车削,需要准确知道并记录刀具的初始车削位置,即初始车削点对应的主轴转角、刀具的

x 向和 z 向坐标位置。所以,如果无法读出机床 x 向导轨传感器的位移信号,则需要在 x 向导轨上安装直线光栅,以测量 x 向导轨的位移(z 向导轨并不工作,可以忽略影响)。

为了使刀具在二次车削时能够准确到达指定位置,需要满足以下条件:(1)需要一个两自由度的 FTS 装置,用于实时调节刀具在 x 向和 z 向的位置;(2)将 x 向导轨与 x 向 FTS 的位移反馈信号叠加在一起,作为 x 向 FTS 的位移反馈量;(3)用 C 轴编码器信号代替时间基,使 FTS 两个方向的运动以 C 轴编码器信号为基准工作,以便保证刀具在 x 向和 z 向同主轴转角保持绝对同步工作,工作原理如图 9 所示。

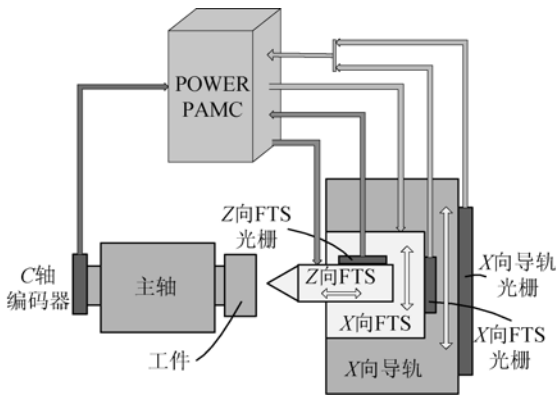


图 9 两自由度 FTS 两轴角度同步工作原理

Fig. 9 Angle synchronous working principle of two DOF FTS system

4.2 误差补偿车削加工试验

本文采用由音圈电机驱动的两自由度 FTS 装置,如图 3 所示,最大工作行程为 0.5 mm,两个方向上的正弦测试跟踪误差都小于 1%,运动分辨率为 50 nm。PMAC (Programmable Multi Axes Controller) 控制器可以准确记录主轴旋转角度和 x 向坐标位置,并具有位移反馈信号的叠加功能和外部时基功能,可满足条件(2)和条件(3)。具体操作如下:机床启动时,主轴转角为零, x 向导轨的位置为 x_b ;FTS 开始车削时,主轴转角为 φ_r , x 向导轨位置为 x_r 。FTS 进行二次车削加工时,对控制器中编码器信号清零,导轨回到初始进给点 x_b 处,主轴回零。当主轴转过角度 φ_r 时, z 向 FTS 开始工作,控制器读取 x 向位置,并判定其与 x_r 的差值,然后输出 x 向位移,使刀具

到达 x_r 处,按照误差补偿路径对自由曲面进行二次车削。刀具在 x 向上的位移差距不会太大,理论上不会超过每转进给量。

二次车削后的误差分布情况如图 10 所示。由图 10 可知,误差得到了一定改善,PV 误差约为 $2 \mu\text{m}$,加工精度提高了 20%,分布情况并没有太大变化。可以认为,误差减少部分主要是由切削力的扰动导致的,在误差补偿车削中,切削力的扰动变小,FTS 的运动精度提高,主轴的跳动减小,从而使加工精度提高。而未补偿部分主要是机床的运动误差产生的。选择与第一次测量相近的位置作为表面形貌的测量点,表面粗糙度值 $R_a = 36 \text{ nm}$,提高了 18.1%,这是因为二次车削的切削力变小,刀具稳定性更好。

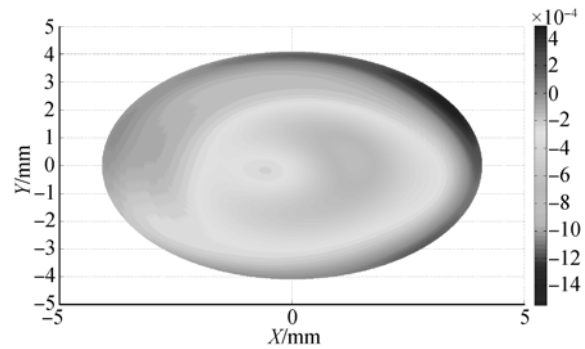


图 10 斜平面误差补偿加工误差分布图

Fig. 10 Error distribution of tilted surface profile after error compensation

根据上述试验结果可以看出,本文成功实现了 FTS 斜面车削的误差补偿加工,改善了表面质量和面形精度。不过,此方法没有考虑机床误差、测量误差、数据处理误差、材料性能等及一些客观因素的影响,并没有获得理想精度的曲面。

5 结 论

本文首次实现了基于 FTS 的金刚石加工误差补偿车削,提高了自由曲面的加工精度和表面质量。该工作解决了 FTS 系统与机床运动的同步问题,可补偿机床 xyz 三向运动误差,可用于自由曲面加工误差的修正,可以实现自由曲面的多次走刀车削,这些都可以大大提高 FTS 技术的加工精度。本文使用的两自由度 FTS 系统及相

关传感器还可用于变进给车削加工,实现更优异的刀具路径,如等车削载荷的刀具路径、等残留高度以及伪随机车削刀具路径等,从而提高车削稳定性,实现更好的加工效果。

本文采用 LVDT 在位测量自由曲面,可通过调节 LVDT 测头半径改变其适用范围,适合于面

形变化较小的自由曲面。该方法测量精度高,简单易实现,有利于推广应用。不过目前的测量数据包含了机床的运动误差,难以大幅度提高加工精度,下一步的研究需要分离该部分误差,并利用两自由度 FTS 进行补偿,以建立完善的光学自由曲面车削加工误差补偿技术。

参考文献:

- [1] 李灿,宋淑梅,刘英,等. 折反式眼底相机光学系统设计[J]. 光学精密工程,2012,20(8): 1710-1717.
LI C, SONG SH M, LIU Y, *et al.*. Design of optical system for catadioptric fundus camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(8): 1710-1717. (in Chinese)
- [2] 王建,刘英,郭帮辉,等. 离轴回转对称棱镜式头戴显示器目镜的研制[J]. 光学精密工程,2012,20(7): 1421-1426.
WANG J, LIU Y, GUO B H, *et al.*. Development of HMD eyepiece with prism of decentered rotationally symmetrical surfaces [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(7): 1421-1426. (in Chinese)
- [3] XIONG W, ZHOU Y S, HE X N, *et al.*. Simultaneous additive and subtractive three-dimensional nanofabrication using integrated two-photon polymerization and multiphoton ablation [J]. *Light: Science & Applications*, 2012, doi: 10.1038/lsa.2012.6 (2012).
- [4] BRINKSMIEIER E. Review on diamond-machining processes for the generation of functional surface structures [J]. *CIRP J Manuf Sci and Technol*, 2012, 5: 1-7.
- [5] YIN Z Q, DAI Y F, LI S Y, *et al.* Fabrication of off-axis aspheric surfaces using a slow tool servo [J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2011, 51(5): 404-410.
- [6] YU D P, WONG Y S, GEOk S H. Optimal selection of machining parameters for fast tool servo diamond turning [J]. *Int J Adv Manuf Technol*, 2011, 57: 85-99.
- [7] LU H, LEE D, KIM J, *et al.*. Modeling and machining evaluation of microstructure fabrication by fast tool servo-based diamond machining [J]. *Precision Engineering-Journal of The International Societies for Precision Engineering and Nanotechnology*, 2014, 38(1): 212-216.
- [8] MA H Q, TIAN J, HU D J. Development of a fast tool servo in noncircular turning and its control [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2013, 41(1-2): 705-713.
- [9] KIM H S, LEE K I, LEE K M, *et al.*. Fabrication of free-form surfaces using a long stroke fast tool servo and corrective figuring with on-machine measurement [J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2009, 49(12-13): 991-997.
- [10] 关朝亮,王建敏,戴一帆,等. 基于 Zernike 多项式拟合的自由曲面车削误差补偿技术[J]. 国防科技大学学报,2010, 32(2): 135-140.
GUAN CH L, WANG J M, DAI Y F, *et al.*. Figure error compensation of freeform surface turning based on Zernike polynomial fitting [J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2010, 32(2): 135-140. (in Chinese)
- [11] 杨佳文,黄巧林,韩友民. Zernike 多项式在拟合光学表面面形中的应用及仿真[J]. 航天返回与遥感,2010,31(5): 49-55.
YANG J W, HUANG Q L, HAN Y M. Application and simulation in fitting optical surface with Zernike polynomial [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2010, 31(5): 49-55. (in Chinese)
- [12] 张伟,刘剑锋,龙夫年,等. 基于 Zernike 多项式进行波面拟合研究[J]. 光学技术,2005, 31(5): 675-678.
ZHANG W, LIU J F, LONG F N, *et al.*. Study on wavefront fitting using Zernike polynomials [J]. *Optical Technique*, 2005, 31(5): 675-678. (in Chinese)
- [13] 刘强. 利用快速刀具伺服车削光学自由曲面的研究[D]. 长春:吉林大学,2012.
LIU Q. *Study on freeform optical surfaces diamond turning assisted by fast tool servo* [D]. Changchun: Jilin University, 2012. (in Chinese)
- [14] 仇谷峰,余景池,黄启泰,等. 接触式三坐标测量自由曲面轮廓的数据处理模型[J]. 光学精密工程,

2013, 21(11): 2813-2820.

QIU G F, YU J CH, HUANG Q T, *et al.*.

Mathematical model of contacting freeform surface contour measurement [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(11): 2813-2820. (in Chinese)

[15] ZDANOWICZ E M. *Design of a fast long range*

actuator-FLORA II [D]. North Carolina State University, 2009.

[16] KONG L B, CHEUNG C F. Design, fabrication and measurement of ultra-precision micro-structured free-form surfaces [J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2011, 61(1): 216-225.

作者简介:



吴庆玲(1984—),女,山东曹县人,博士研究生,2007年、2009年于吉林大学分别获得学士、硕士学位,主要从事材料微观力学性能原位测试技术与仪器等方面的研究。E-mail: wuqlsmile@163.com

(本栏目编辑:马 健)

(版权所有 未经许可 不得转载)