

文章编号: 0258-7025(2007)12-1705-05

大口径非球面镜加工建模与控制技术

陈建平^{1,2}, 沈林成²

(¹ 闽江学院, 福建 福州 350108; ² 国防科学技术大学电机工程与自动化学院, 湖南 长沙 410073)

摘要 数控(NC)加工技术是解决非球面镜加工困难的一种方法。针对激光装置所使用的大口径光学玻璃非球面透镜,提出采用超精密磨削技术来实现高效、高精度的成型加工。通过加工实验研究了控制磨削切深和进给速度对表面加工质量的影响,寻找出大切深缓进给的磨削加工方式,改善了元件表面加工质量,有效抑制了加工过程引入的亚表面缺陷。开展了非球面补偿加工技术实验研究,采用等面形误差曲线补偿加工方法,能有效降低元件面形峰谷(PV)值,通过两次补偿加工,330 mm×330 mm非球面镜的磨削面形误差可控制在约3 μm,获得较为理想的面形加工精度。

关键词 光学设计与制造;超精密加工;非球面磨削;补偿加工;加工精度;面形检测

中图分类号 TH 161⁺.1 **文献标识码** A

Model and Control Technology for Machining Large-Diameter Optical Aspheric Mirror

CHEN Jian-ping^{1,2}, SHEN Lin-cheng²

¹Minjiang University, Fuzhou, Fujian 350108, China
²College of Electromechanical Engineering and Automation,
National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China

Abstract Numerical control (NC) machining is an effective method for solving the problem of aspheric machining. For the application of aspherical lens in large solid-state laser system, a novel method via ultra-precision grinding has been proposed to shape the hard-brittle material with high accuracy and efficiency. To improve the machining quality and efficiency, the machining experiments are carried out to find the influence of grinding depth and feeding speed on surface quality. The subsurface defects have been effectively restrained by adopting the larger grinding depth and smaller feeding speed. And the compensation machining is also investigated. The compensation machining with equal profile error curve can reach fine surface with less than 3-microns error in peak-valley (PV) values for 330 mm×330 mm aspherical lens.

Key words optical design and fabrication; ultra-precision machining; aspheric grinding; compensation machining; machining accuracy; profile measuring

1 引言

在用于惯性约束聚变(ICF)的巨型激光装置中,需使用大口径的非球面透镜以实现激光光束的聚焦^[1]。这类元件具有口径大(超过300 mm)^[2,3]、像质精度高(波前畸变优于λ/5)和异形孔径等特点,采用传统加工技术加工周期长,对人的依赖性太

强,已经不能满足大型光学工程任务的需求。国内外普遍认为超精密数控加工技术是解决非球面镜加工问题的根本途径。在超精密加工的各种方法中,精密磨削是决定加工工件的形状精度、表面粗糙度和表面加工质量的主要手段^[4,5]。本文针对我国大功率固体激光装置对大口径非球面聚焦透镜的要

收稿日期:2007-10-31;收到修改稿日期:2007-11-08

作者简介:陈建平(1965—),男,福建人,国防科学技术大学博士研究生,主要从事精密加工与控制技术、科技与教育管理方面的研究。E-mail:chenjp631@sina.com

导师简介:沈林成(1965—),男,江苏人,教授,博士生导师,主要从事人工智能、图像处理、任务规划与精确制导等方面的研究。E-mail:lcshe@nudt.edu.cn

求,对超精密磨削加工精度与效率优化进行深入研究,从提高元件加工质量和效率两个方面入手,优化磨削工艺参数,实验研究磨削切深和进给速度对表面质量的影响以及补偿加工技术,探索大口径、方形孔径非球面的高精度、高效制造技术。

2 非球面加工控制模型

对于非球面镜的数控加工,超精密数控磨削要完成半精磨、精磨二个阶段,它是加工光学非球面镜的基础,通过数控磨削可以得到非球面镜的基本面形。半精磨的目的是去除粗磨阶段产生的峰谷(PV)层和磨削微裂纹层,并提高磨削的面形精度,在半精磨时选用中等粒度的金刚石砂轮、中等走刀间距和较小的磨削深度。精磨的目的是进一步提高磨削的面形精度,必须选用粒度很细的金刚石微粉砂轮,采用很小的走刀间距和磨削深度,同时在精磨中要提高数控编程精度,得到具有较高面形精度的基本非球面镜面形。非球面在经过超精密磨削加工后,应具有精确的面形精度,较好的表面粗糙度,以减少抛光时间,提高加工效率。整个工艺流程如图1所示。

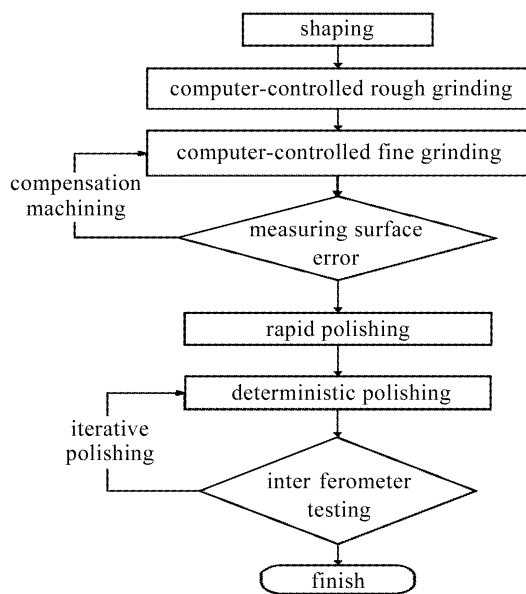


图1 非球面加工方法流程图

Fig. 1 Aspheric machining flow chart

随着计算机辅助制造技术和数控加工技术的发展,可以在数控机床上加工出非球面^[6]。完整轴对称非球面加工系统包括3轴数控机床、金刚石砂轮、砂轮修整器及检测装置。考虑非球面镜的轴对称性,采用同时三个坐标(X,Z,B)的轮廓控制加工方式,磨削透镜时X,Z,B三轴同时移动,保证砂轮外圆的某点始终与被加工的透镜相切。X,Z,B三轴联

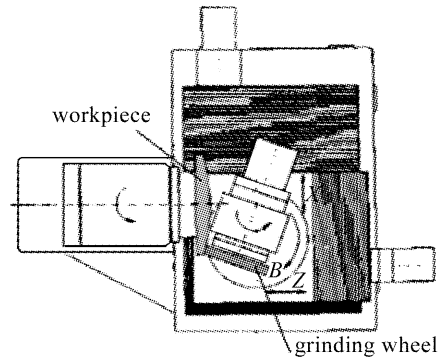


图2 机床结构原理图

Fig. 2 Schematic diagram of machine tool structure 动时的函数与非球面透镜的函数、砂轮半径及砂轮中心至转台中心的距离有关。具体结构原理图如图2所示。

从加工精度方面考虑,选择细粒度砂轮可获得较小的表面破坏层深度,以保证元件表面加工质量;从加工效率方面考虑,选择粗粒度砂轮可获得较强的材料去除能力,缩短加工时间,同时少换砂轮以减少砂轮修整和动平衡等辅助时间,提高加工效率;根据保证精度前提下尽量提高效率原则,在170[#], 600[#], 1000[#]和1500[#]金刚石砂轮中,选择170[#]与1000[#]金刚石砂轮的组合加工组成超精密磨削工序^[7,8]。

如图3所示,加工中平面砂轮加工点沿轴对称非球面母线运动,而轴对称非球面工件绕其旋转轴旋转。通过图中的几何关系,可计算出非球面加工机床的控制中心坐标。

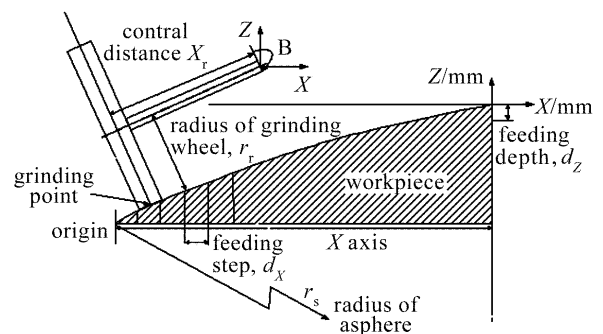


图3 平面砂轮加工控制模型

Fig. 3 Machining control model of plane grinding wheel

砂轮加工点沿轴对称非球面母线进给,加工中平面砂轮始终垂直于轴对称非球面工件表面。设非球面母线函数为 $f(x)$,将轴对称非球面母线分为 n 段, $n+1$ 个节点。轴对称非球面镜加工时,砂轮沿 $n+1$ 个节点进行直线插补。设这些节点分别为 $A_0A_1\cdots A_iA_{i+1}\cdots A_n$ 。而 A_{i-1} 与 A_i 之间的非球面镜母线部分为 l_i 。在轴对称非球面镜母线上插补点坐标

为 $(x_i, f(x_i))$, 而该点导数为 $f'(x_i)$ 。则可得该插补点的法线方向与垂直方向构成的角度为 $\arctan(f'(x_i))$ 。为了达到砂轮均匀磨损的目的, 必须将砂轮亦相应分为 n 段, $n+1$ 个节点。以其中第 i 段加工 l_i 。

设平面砂轮半径为 r , 砂轮转速为 ω , 则平面砂轮各加工点线速度均为 $\omega \cdot r$ 。由于砂轮各加工点线速度一致, 所以在平面砂轮均匀磨损加工中, 将砂轮实际使用宽度 w_b 等长度分为 n 段, 即可达到等长度的砂轮磨削等量的工件。一般情况下砂轮实际使用宽度 w_b 应比砂轮实际宽度小 $1 \sim 2$ mm。则可得平面砂轮均匀磨损加工中的控制公式为

$$\begin{cases} X = x_i - r_r \times \sin\theta + \\ \quad \left(X_r + \frac{w_b}{2} - i \times \frac{w_b}{n} \right) \times \cos\alpha \\ Z = f(x_i) + r_r \times \cos\theta + \\ \quad \left(X_r + \frac{w_b}{2} - i \times \frac{w_b}{n} \right) \times \sin\alpha \\ B = \alpha \end{cases}, \quad (1)$$

式中 α 为主轴转角, 在平面砂轮加工中为 $\alpha = \arctan(f'(x_i))$, θ 为工件表面的法向角度即 $\theta = \arctan(f'(x_i))$, X_r 为砂轮中心至回转中心距离, X, Z, B 为机床控制中心坐标。

加工中, 高精度非球面制造软件系统根据输入的加工参数生成数控程序, 该程序通过软件系统中的通信模块传入机床。磨削机床由两维直线移动轴 (X 轴, Z 轴)、一维偏转轴 (B 轴) 和工件、砂轮自转轴组成, 高速旋转的金刚石砂轮在数控程序的控制下完成旋转对称非球面光学元件的精密磨削加工。电感测微仪用于元件磨削表面面形的在位接触式测量。根据元件面形测量情况, 针对非球面镜加工的特点应用补偿加工技术, 经过补偿加工后, 光学元件面形精度得到有效的控制^[9]。

3 磨削深度与进给速度关系

加工中轴对称非球面工件绕 Z 轴逆时针旋转, 同时砂轮沿 X 轴正方向从 A 点进给至原点 O 。当 X 轴加工进给速度为匀速时, 称其为匀速进给加工。如图 4 所示, 此时由于工件旋转角速度、砂轮进给速度不变, 则可得非球面工件旋转一周砂轮进给距离始终保持不变。所以可知工件表面加工俯视轨迹为一螺旋线。

在这种匀速磨削过程中, 工件的去除量与砂轮在该点的停留时间、磨削线速度成正比。对于激光

光学元件加工, 单位时间内材料的磨削去除能力仅仅是影响加工效率的关键因素之一, 而加工中所形成的表面及亚表面破坏则在很大程度上决定了后续抛光的工艺时间, 因此也是必须关注的关键因素。为确定进给速度和切深对加工元件表面质量的影响, 以一组 $\phi 50$ mm 的 UBK7 玻璃为实验元件, 170# 砂轮采用不同切深以不同进给速度加工, 之后采用显微镜观测元件表面, 表 1 为实验方案。

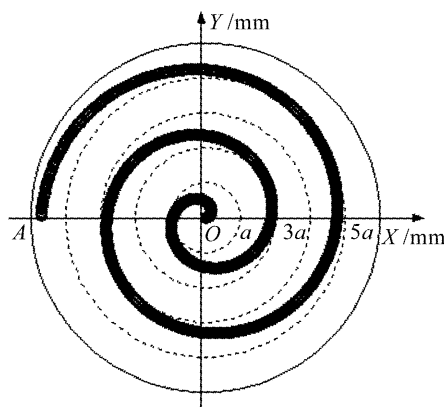


图 4 加工轨迹俯视图

Fig. 4 Machining locus planform

表 1 切深和进给速度实验方案

Table 1 Experimental project of grinding depth and feed speed

$\Delta z / \mu\text{m}$	$F / (\text{mm}/\text{min})$		
	10	50	100
2	1#	2#	3#
8	4#	5#	6#
20	7#	8#	9#

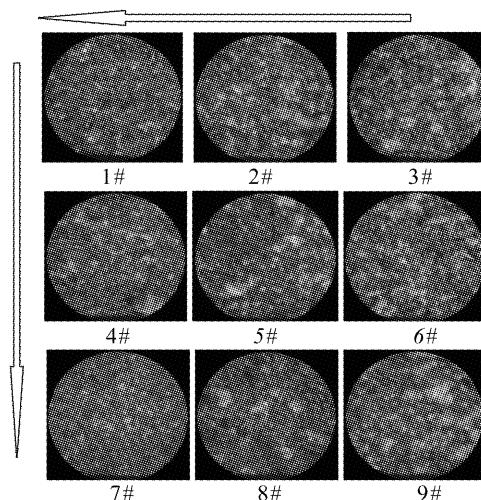


图 5 磨削表面

(放大 500 倍, 箭头指示表面质量变好方向)

Fig. 5 Grinding surface quality

(zoom in 500 times, the arrow direction means fine quality)

如图 5 所示, 当进给速度 F 一定时, 切深 Δz 分

别取 $2\ \mu\text{m}$, $8\ \mu\text{m}$ 和 $20\ \mu\text{m}$,随着切深的加大,磨削表面的缺陷尺度缩小,表面缺陷的形态趋于光滑,元件磨削表面的砂眼逐渐由体积大而深变为体积小而浅,即元件表面加工质量逐渐变好。这表明,在磨削过程中,需在一定的切深下,才能使砂轮的金刚石颗粒保持良好的自锐性能,避免钝化和脱落。当切深 Δz 一定时,进给速度分别取 $10\ \text{mm}/\text{min}$, $50\ \text{mm}/\text{min}$ 和 $100\ \text{mm}/\text{min}$,随着进给速度的增大,砂眼逐渐由体积小而浅变为体积大而深,即元件表面加工质量逐渐变差。实验表明,大切深、缓进给磨削加工方式有利于改善元件表面加工质量,抑制加工过程引入的亚表面缺陷^[10]。

4 磨削阶段面形检测

对于大口径非球面镜磨削加工来说,铣磨成型阶段的精度易于由机床来保证,但在半精磨、精磨阶段中面形误差与理想值偏差比较大,而且表面粗糙度不佳,所以不能应用传统的激光数字干涉仪进行测量,因此需要开发接触式或非接触式传感器系统应用于机床在位测量,评价加工精度,同时为补偿加工提供误差数据^[11,12]。

充分利用机床运动系统,所开发测量系统如图6所示,接触式测量系统采用电感测微仪或长度计,分辨率为 $0.1\ \mu\text{m}$,非接触测量系统采用激光位移传感器,分辨率为 $0.02\ \mu\text{m}$ 。其提供了基于RS-232接口的数字输入输出功能,可以通过该接口控制传感器,并获得传感器所测得的位移及光强数据。测量时测量软件根据机床提供的脉冲信号来确定采样点,并将所得的位移数据转换为非球面镜表面误差数据。整个系统实现简单、经济性好、精度高、通用性强、测量过程简便、具备快速在线检测功能,尤其适合大口径非球面在半精磨加工阶段的检测^[13]。

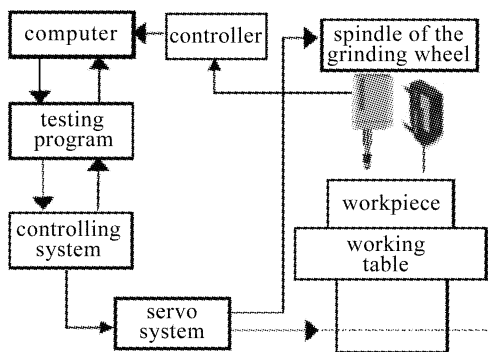


图6 测量系统构成

Fig. 6 Measurement system diagram

5 补偿加工实验

在执行初始加工程序后,得到非球面元件的面形峰谷值较大,误差来源主要有机床的机械精度(微米量级)、砂轮形状精度和综合环境误差(如温度变化造成的机械运动累积误差等)。因此,为提高加工精度,需进行补偿加工。首先根据实测误差拟合出补偿误差曲线,提供补偿加工所需的误差数据;然后根据测量方式不同以不同方法将剩余数据拟合成一条叠加于轴对称非球面镜母线上的误差连续曲线,如图7所示。

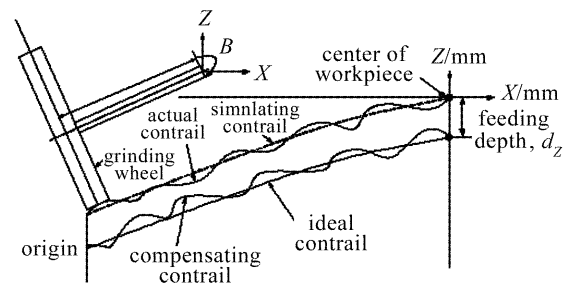


图7 补偿加工原理图

Fig. 7 Schematic diagram of compensation machining

在改进和优化磨削工艺参数的基础上,开展该补偿加工实验,实验参数如表2所示。初始加工和补偿加工分别进行两道。加工完后用电感测微仪测量面形,测头由该 $330\ \text{mm} \times 330\ \text{mm}$ 非球面元件圆心划至尖角。检测结果如图8~10所示。

表2 非球面镜补偿加工参数

Table 2 Parameters of compensation machining

Workpiece	330 mm × 330 mm K9 glass
Granularity of grinding wheel	1000#
Speed of spindle / (r/min)	66
Speed of grinding wheel / (r/min)	1500
Feeding depth / μm	20
Feeding speed / (mm/min)	6~10

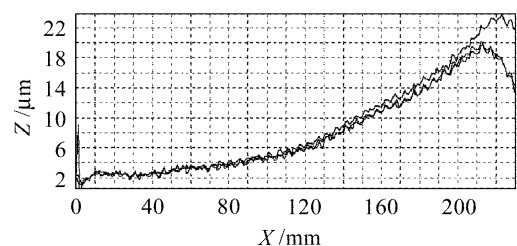


图8 初始加工面形检测结果(峰谷值= $19\ \mu\text{m}$)

Fig. 8 Measurement result of initial machining

(PV= $19\ \mu\text{m}$)

初始加工完后,采用等面形曲线补偿加工(即将元件磨削后的面形检测曲线1:1等比例地作为补偿

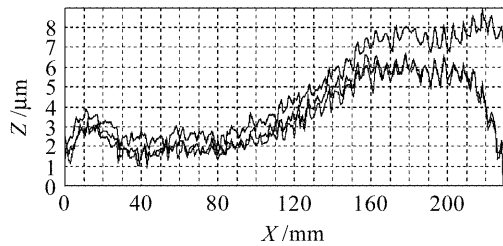


图 9 第一次补偿加工面形检测结果(峰谷值=5~7 μm)

Fig. 9 Measurement result of the first compensation machining (PV=5~7 μm)

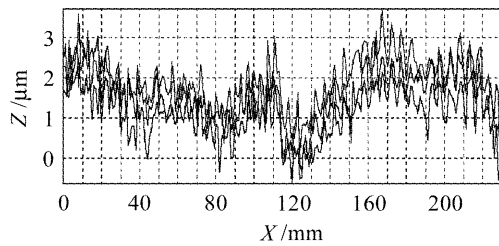


图 10 第二次补偿加工面形检测结果(峰谷值=3 μm)

Fig. 10 Measurement result of the second compensation machining (PV=3 μm)

曲线,将补偿曲线与初始加工程序叠加得到补偿加工曲线),通过第一次补偿加工,可以有效地将元件面形峰谷值控制在小于7 μm 。同时在元件外部面形峰谷值较高处,适当降低进给速度,进行第二次补偿加工后,面形的峰谷值进一步降低至3 μm 。因此,1000[#]砂轮补偿加工,采用等面形曲线补偿加工,同时加上元件外部的慢速加工,可以抑制元件外部面形峰谷值异常突起,获得较高的面形加工精度^[14]。

6 结 论

采用高效、超精密磨削技术进行非球面光学元件加工,可使得铣磨成型后的非球面面形精度和(亚)表面缺陷层深度由数十微米达到微米量级,在数控精抛工序前,较好地保证了光学元件的面形精度,最终有效地缩短整个加工时间。对超精密磨削加工精度与效率优化方面进行了加工实验研究。

1) 研究切深和进给速度对表面加工质量的影响,寻找出大切深缓进给的磨削加工方式,改善了元件表面加工质量,有效降低了抛光阶段的加工时间;

2) 在改进和优化磨削工艺参数的基础上,开展非球面镜补偿加工技术研究,采用等面形误差曲线补偿加工方法,有效地降低元件面形峰谷值,同时加上砂轮在元件外部的慢速加工,可以抑制元件外部面形峰谷值异常突起,获得约3 μm 的面形精度。

参 考 文 献

- Zheng Jianzhou, Yu Qingxu, Lu Yongjun *et al.*. Improved lens arrays optical system with control lable focus width for uniform irradiation [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(3):331~336
郑建洲,于清旭,卢永军 等. 焦距可调的透镜阵列均匀辐照光学系统[J]. *中国激光*, 2007, **34**(3):331~336
- Fan Bin, Wan Yongjian, Chen Wei *et al.*. Manufacturing features comparing between computer control active-lap and computer control optical surface for large aspheric optics [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(1):128~132
范斌,万勇建,陈伟 等. 能动磨盘加工与数控加工特性分析[J]. *中国激光*, 2006, **33**(1):128~132
- Cui Xiangqun, Gao Bilie, Wang Daxing *et al.*. A new polishing technology for large diameter and deep aspherical mirror [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(3):402~407
崔向群,高必烈,汪达兴 等. 一种大口径大非球面度天文镜面磨制新技术[J]. *光学学报*, 2005, **25**(3):402~407
- Wen Xiulan, Lin Song, Tan Xin *et al.*. Super-Precision Processing Technology and Equipment [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2006
文秀兰,林宋,谭昕 等. 超精密加工技术与设备[M]. 北京:化学工业出版社, 2006
- Li Quansheng, Cheng Ye, Zhang Bopeng *et al.*. NC fabrication method of optical free-form surface [J]. *Optical Technology*, 1998, **24**(6):77~81
李全胜,成晔,张伯鹏 等. 光学自由曲面数控化加工方法[J]. *光学技术*, 1998, **24**(6):77~81
- J. S. Lee, K. Soyji. A study on ultra precision machining for aspherical surface of optical parts [J]. *Journal of the Korean Society of Precision Engineering*, 2002, **19**(10):195~201
- Jiwang Yan, Katsuo Syoji, Tsunemoto Kuriyagawa. A New Diamond Turning Method for Fabrication of Convex aspheric Surface on Hard Brittle Material [C]. 10th International Conference on Precision Engineering, 2001, Yokohama, Japan, 254~258
- Masara Saeki, Tsunemoto Kuriyagawa, Joo-Sang Lee *et al.*. Machining of Aspherical Opto-Device Utilizing Parallel Grinding Method [C]. ASPE Annual, 2001, USA, 433~436
- Huang Hao, Guo Yinbiao, Wang Zhenzhong *et al.*. Error separation and compensation technology of axisymmetric aspheric machining [J]. *Chinese J. Mechanical Engineering*, 2005, **41**(12):177~181
黄浩,郭隐彪,王振忠 等. 轴对称非球面加工误差分离及补偿技术[J]. *机械工程学报*, 2005, **41**(12):177~181
- O. B. Abouelatta, J. Madl. Surface roughness prediction based on cutting parameters and tool vibrations in turning operations [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2001, **118**(1-3):269~277
- Arai Yoshikazu, Gao Wei, Shimizu Hiroki Su. On-machine measurement of aspherical surface profile [J]. *Nanotechnology and Precision Engineering*, 2004, **2**(3):210~211
- Chang-Ock Lee, Kilsu Park, Byong Chon Park *et al.*. An algorithm for stylus instruments to measure aspheric surfaces [J]. *Meas. Sci. Technol.*, 2005, **16**(5):1215~1222
- Otto Wolfgang, Matthes Axel, Schiehle Heinz. Measuring large aspherics using a commercially available 3D-coordinate measuring machine [C]. *SPIE*, 2000, **4003**:91~97
- Zheng Zhenrong, Sun Xutao, Gu Peifu *et al.*. Design of objective lens with reflective spherical Fresnel zone plate [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(10):1483~1487
郑臻荣,孙旭涛,顾培夫 等. 应用反射型球面菲涅耳波带片的成像物镜设计[J]. *光学学报*, 2006, **26**(10):1483~1487