

影响方形非球面光学元件加工精度的工艺研究

吴庆堂^{1,2} 聂凤明² 王大森² 史国权¹ 吴焕² 李珊^{2*} 郭波²

(¹长春理工大学机电工程学院, 吉林 长春 130021
²长春设备工艺研究所超精密加工技术研究室, 吉林 长春 130012)

摘要 分析了方形非球面光学元件磨削加工中产生四角塌边误差的原因, 计算了方形非球面光学元件磨削加工时砂轮轴系两种安装方式的磨削系统刚度, 讨论了砂轮轴系安装的位置对加工精度的影响, 进行了砂轮轴系两种安装方式的方形光学元件磨削试验, 以及不同砂轮型号、工艺参数的磨削试验, 确定了能够满足方形非球面光学元件加工精度的砂轮轴系安装位置结构及磨削工艺参数。

关键词 光学制造; 方形非球面; 精密磨削; 四角塌边误差

中图分类号 TG584 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.0316001

Research on Technology of Influence Square Aspheric Optical Element Processing Accuracy

Wu Qingtang^{1,2} Nie Fengming² Wang Dasen² Shi Guoquan¹ Wu Huan²
Li Shan² Guo Bo²

(¹College of Mechanical and Electric Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130021, China
²Laboratory of Ultra-Precision Fabrication, Changchun Institute of Equipment and Process, Changchun, Jilin 130012, China)

Abstract The reason of making propeller error in grinding square aspheric optical elements is analyzed. Each rigidity index of two fixing methods of abrasion wheel axis is calculated, and then the influence of abrasion wheel axis fixing position on the processing accuracy. The experiment at each position is done. Different abrasion wheel and different processing parameter are used to do the grinding experiment. Finally, the abrasion wheels axis fixing position and the grinding processing parameters which can satisfy the processing accuracy of square aspheric optical element are obtained.

Key words optical fabrication; square aspheric surface; precision grinding; propeller error

OCIS codes 220.4610; 220.4840; 220.4880

1 引言

目前, 高精度、高质量非球面光学元件的需求与日俱增, 新的加工非球面光学元件的方法——超精密非球面磨削技术, 因其可克服传统加工法的低效率、高成本等缺点而越来越受到人们的关注, 欧美、日本等发达国家在中大口径元件磨削加工方面取得了显著成果, 而我国中大口径非球面元件制造技术起步晚, 还不能实现高效、高精度加工, 尤其在磨削加

工技术方面, 与发达国家相比还有很大差距^[1,2]。非球面光学元件超精密磨削加工是一个多种因素综合作用的过程, 产生光学元件面形误差因素较多^[3~6]。本文针对方形非球面磨削加工中产生四角塌边误差的原因进行了分析, 计算了砂轮轴系两种不同安装位置的磨削系统刚度, 通过不同工艺参数的试验研究, 优化了系统结构, 消除了局部误差, 进而提高了工件表面面形精度及加工效率。

收稿日期: 2011-10-24; **收到修改稿日期**: 2011-12-14

基金项目: 国防基础科研项目(A0920110016)资助课题。

作者简介: 吴庆堂(1973—), 男, 博士研究生, 高级工程师, 主要从事精密机械先进制造技术和工艺研究以及中大口径光学元件精密、超精密加工工艺技术及设备等方面的研究。E-mail: wqtwj@sohu.com

导师简介: 史国权(1965—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事精密、超精密加工技术方面的研究。E-mail: sgq@cust.edu.cn

* **通信联系人**。E-mail: lish.coral@gmail.com

2 非球面光学元件磨削原理及设备

2.1 磨削原理

非球面按照其面形基本上可以分为具有面对称的曲面和由一定的数学方程式给定的具有对称轴线的回转面(如椭球面、抛物面、双曲面等)两类。

非球面的一般方程^[7]为

$$Y^2 = a_1 X + a_2 X^2 + a_3 X^3 + \dots, \quad (1)$$

非球面方程式存在两个未知量 X, Y , 如果确定 X, Y 坐标, 然后绕回转轴旋转, 就得到二次曲面。但是, 磨削加工时, 必须考虑砂轮的结构和安装形式, 保证良好的磨削效果, 确定砂轮的点接触磨削, 所以采用平面砂轮必须保证砂轮与工件相切, 如图 1 所示, 非球面镜磨削必须要加入砂轮轴的转动, 保证砂轮母线始终与非球面相切。

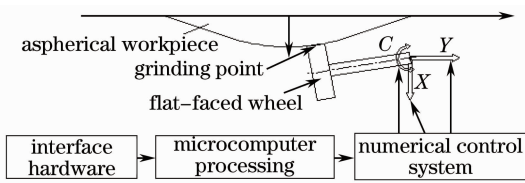


图 1 平面砂轮加工非球面原理

Fig. 1 Principle of grinding aspheric optical elements

非球面光学元件磨削加工过程中, 工件轴导轨 Y 轴、砂轮轴导轨 X 轴、转台 C 轴数控联动实现非球面的磨削加工。磨削过程中, X, Y, C 轴按非球面光学元件面形曲线方程移动, 保证砂轮外侧母线始终和被加工非球面光学元件面形相切, 确保磨削点始终与非球面母线相切, 然后通过工件轴旋转运动, 砂轮切削运动, 磨削出非球面光学元件。为保证砂轮外圆上某点与非球面光学元件始终相切, 必须通过砂轮轴转台运动来保证。所以 X, Y, C 三轴联动插补程序不仅与非球面透镜的方程式有关, 而且和砂轮半径及砂轮中心至转台中心的距离有关。

2.2 精密磨削设备结构

设备结构采用端面磨床式结构^[8,9], 磨床结构如图 2 所示, 采用平面金刚石砂轮磨削加工光学非球面。磨床主要由工件主轴、砂轮轴系、工件轴导轨 Y 轴、砂轮轴导轨 X 轴、 C 轴转台、数控系统、辅助系统等组成。为保证设备具有高精度、高刚度、高稳定性和保持性的结构要求, 导轨、轴系和转台均采用液体静压结构, 液体静压结构具有精度高、刚度大、移动灵活等优点。其中静压导轨的直线精度为 $0.3 \mu\text{m}/300 \text{mm}$, 刚度为 $1500 \text{N}/\mu\text{m}$; 静压轴系的跳动精度为 $0.1 \mu\text{m}$, 刚度为 $1260 \text{N}/(\text{m}^{[10-12]})$; 位部件安装精度, 砂轮轴与工件轴的等高精度为 $0.5 \mu\text{m}$, X

轴与 Y 轴导轨的垂直精度为 $0.5 \mu\text{m}$ 。

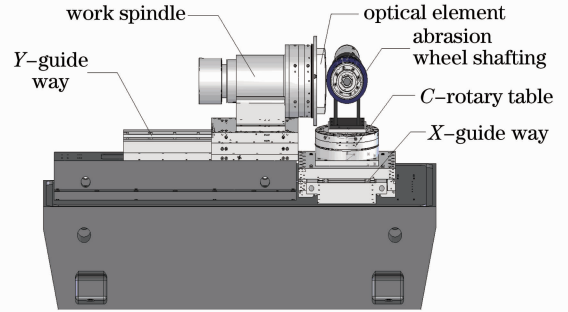


图 2 磨床模型图

Fig. 2 Grinding machine

3 四角塌边误差产生的原因

磨削加工方形非球面光学元件时, 由于存在不连续磨削状态, 砂轮在光学元件直角边缘处磨削过程中在瞬间接触冲击力作用下存在冲击、让刀现象, 所以边缘与其他区域的材料去除率不同, 将导致边缘加工表面呈现出不同程度的高、低区域, 如图 3 所示。元件在同一半径处, 图 3 中圆弧 ABC 上, 面形高低应该一致, 但实际由于砂轮让刀加工出现了不一致现象, 边线处有明显的塌边现象, 塌边处面形形状类似螺旋桨的横截面, 称之为四角塌边误差, 其中, a 值为四角塌边误差值。四角塌边误差虽然是局部误差, 但是影响了整体面形精度, 在下一步的超精密抛光工序中, 为消除四角塌边误差, 必须进行元件的全面抛光加工, 抛光去除量由四角塌边误差的大小决定。所以, 四角塌边误差增加了抛光量, 延长了抛光加工的时间, 降低了光学元件的加工效率, 没有达到非球面光学元件磨削加工提高光学元件的加工精度、加工效率的目的。

四角塌边误差与磨床刚度、结构、主轴转速、砂轮轴转速、砂轮粒度等多种因素有关, 但是四角塌边误差产生的主要原因是磨床的磨削刚度造成的。

四角塌边误差产生的主要原理为: 元件顺时针

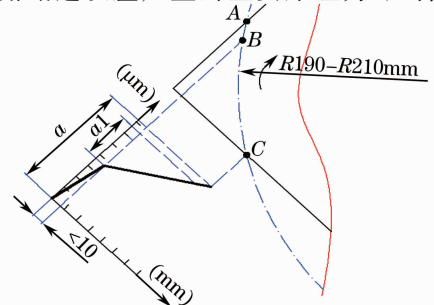


图 3 四角塌边误差示意图

Fig. 3 Schematic diagram of propeller error

旋转, 金刚石砂轮首先接触元件的上边缘, 在刚接触时产生的冲击力作用下, 由于接触面积小, 砂轮还未完全让刀, 上边缘的材料即很快被去除, 圆弧段面形很低, 随着元件的旋转, 砂轮进入 BC 圆弧段磨削, 接触面积增大, 磨削力增加, 因为砂轮系统刚度不足, 砂轮在磨削反作用力的作用下逐渐产生让刀, 导致出现元件在同一半径上面形不同的加工误差 (即四角塌边现象)。图 4 (彩图见电子版) 所示为一个光学元件加工中产生的四角塌边误差, 导致元件在图中椭圆红圈框内的区域面形较低, 元件全面抛光后其余地方都抛亮了, 唯独该区域发毛。



图 4 方形光学元件加工中产生的四角塌边误差
Fig. 4 Propeller error generate in grinding operation

4 砂轮轴安装结构优化

传统的砂轮轴与转台安装位置如图 5 所示, 砂轮轴系统支座中心与转台中心相重合, 转台采用高刚度、高精度谐波减速器驱动。这种安装形式, 结构对称, 转动惯量小, 所以提高了转动精度和转动速度, 但是降低了砂轮轴磨削系统刚度。这种安装结构的系统刚度示意图如图 6 所示, 丝杠为两端固定, 轴承预紧形式, 砂轮轴轴向上的磨削系统刚度 K 为

$$\frac{1}{K} = \frac{1}{K_L} + \frac{1}{2K_B} + \frac{1}{4K_{\Delta\min}} + \frac{1}{K_{NR}} + \frac{1}{2K_{BR}} + \frac{1}{K_{\theta}} + \frac{1}{K_N} + \frac{1}{K_1} + \frac{1}{K_2} + \frac{1}{K_3} + \frac{1}{K_4}, \quad (2)$$

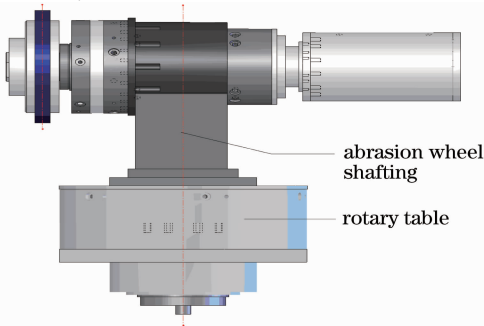


图 5 砂轮轴系居中安装结构图
Fig. 5 Structural pattern of abrasion wheel shafting at middle

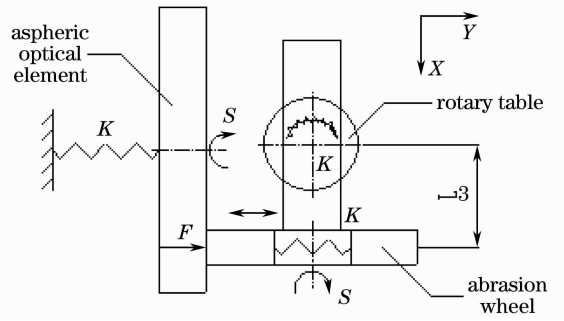


图 6 砂轮轴系居中安置结构磨削加工刚度示意图
Fig. 6 Grinding rigidity schematic diagram of abrasion wheel shafting at middle

式中, K_L 为联轴节扭转刚度, 扭转刚度的影响与拉压刚度相比较可以忽略不计^[13]; K_B 为轴承轴向刚度, $1750 \text{ N}/\mu\text{m}$; $K_{\Delta\min}$ 为丝杠最小拉压刚度, $3200 \text{ N}/\mu\text{m}$; K_{NR} 为丝杠螺母与导轨连接刚度, $2041 \text{ N}/\mu\text{m}$; K_{BR} 为轴承座刚度, $3050 \text{ N}/\mu\text{m}$; K_{θ} 为丝杠扭转刚度, 扭转刚度的影响与拉压刚度相比较可以忽略不计^[13]; K_N 为螺母轴向刚度, $3200 \text{ N}/\mu\text{m}$; K_1 为工件主轴轴向刚度, $1860 \text{ N}/\mu\text{m}$ 。另外, 安装工件的工作台为直径大于方形光学元件对角线长度的圆盘, 将光学元件整体粘接在工作台上, 光学元件与工作台成为一体, 光学元件四角的轴向刚度与中心一致, 所以, 光学元件的轴向刚度即为工件轴的轴向刚度; K_2 为砂轮轴 Y 向刚度, $1860 \text{ N}/\mu\text{m}$; K_3 为磨削点对谐波转台扭转刚度, $90 \text{ N}/\mu\text{m}$; K_4 为砂轮导轨 Y 向刚度, $1800 \text{ N}/\mu\text{m}$ 。

计算砂轮轴轴向磨削系统刚度 K :

$$K = 1 / \left(\frac{1}{K_L} + \frac{1}{2K_B} + \frac{1}{4K_{\Delta\min}} + \frac{1}{K_{NR}} + \frac{1}{2K_{BR}} + \frac{1}{K_{\theta}} + \frac{1}{K_N} + \frac{1}{K_1} + \frac{1}{K_2} + \frac{1}{K_3} + \frac{1}{K_4} \right) = 71.06 \text{ N}/\mu\text{m}。$$

由于谐波扭转刚度 K_x 转换为 Y 向磨削点接触刚度 K_3 较小, 导致作用在磨削点 Y 方向上的总刚度

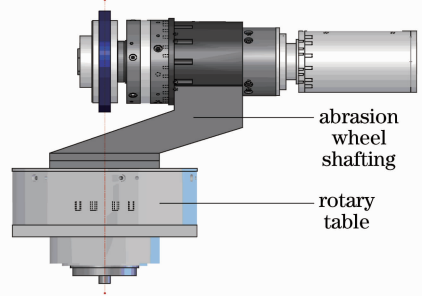


图 7 砂轮轴系前置安装结构图
Fig. 7 Structural pattern of abrasion wheel shafting at front

K 较小。为了提高刚度 K 值,将砂轮轴结构进行优化、调整,支座与转台安装位置前置,如图 7 所示。作用在磨削点 Y 方向的压力 F 始终通过转台中心,系统刚度示意图如图 8 所示,取消 Y 向磨削作用力 F 与转台中心的距离 L ,即 $L = 0$,谐波扭转刚度 K_x 转换为磨削点 Y 向接触刚度 K_3 。值为无穷大,所以,转台的扭转刚度可以忽略,综合各部分刚度作用在磨削点 Y 方向上的总刚度 K 为

$$K = 1 / \left(\frac{1}{K_L} + \frac{1}{2K_B} + \frac{1}{4K_{\Delta\min}} + \frac{1}{K_{NR}} + \frac{1}{2K_{BR}} + \frac{1}{K_{\theta}} + \frac{1}{K_N} + \frac{1}{K_1} + \frac{1}{K_2} + \frac{1}{K_4} \right) = 337.72 \text{ N}/\mu\text{m}.$$

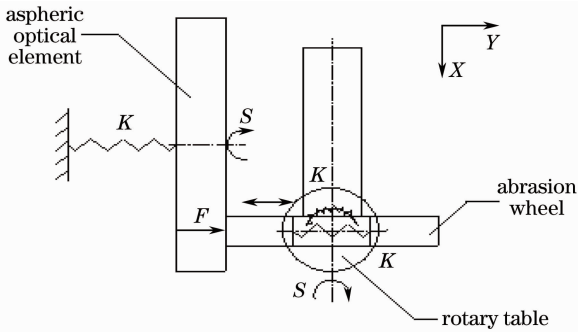


图 8 砂轮居中磨削加工刚度示意图

Fig. 8 Grinding rigidity schematic diagram of abrasion wheel shafting at front

砂轮轴结构优化后的磨削系统刚度得到了很大的提高。

5 方形光学元件磨削试验

为降低四角塌边的误差,进行了两种砂轮安装位置与不同型号砂轮、不同磨削深度的磨削试验。

5.1 不同砂轮安装位置磨削试验

在非球面光学元件磨削设备上进行了方形光学元件的磨削试验,针对同样一件 K9 方形光学玻璃,按照图 5、图 7 砂轮轴系与转台两种不同安装结构,通过相同的切削深度、进给量、砂轮型号进行了磨削试验,试验结果如图 9 和表 1 所示,并进行了在线检测^[12]。

表 1 中 ΔY 为磨削深度; F 为 X 轴进给速度; S 为工件轴转速, a_1 为砂轮轴系居中安装时产生的四角塌边误差, a_2 为砂轮轴系前置安装时产生的四角塌边误差。

通过试验数据分析,磨削 K9 光学玻璃,对同样的磨削工艺参数,砂轮轴居中安装结构四角塌边误差大,变化幅度明显,但是对于砂轮前置安装结构,

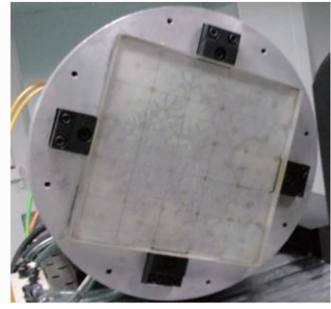


图 9 方形光学元件加工图

Fig. 9 Grinding schematic diagram of square aspheric optical element

四角塌边误差明显小,变化幅度不明显,而且磨削深度在一定范围以内,四角塌边误差基本稳定;砂轮轴系前置,同一粒度的砂轮,随着磨削深度减小,四角塌边误差逐渐减小,但是磨削深度减少到一定程度时,磨削量减小,四角塌边误差变化不明显,趋于稳定。

表 1 砂轮安装位置不同的磨削结果

Table 1 Grinding results of abrasion wheel fixing at different positions

Size of abrasion wheel	$a_1/\mu\text{m}$	Trinding parameters	$a_2/\mu\text{m}$
D90 [#]	25	$\Delta Y50 \mu\text{m}, F8, S180$	1.2
abrasion	9	$\Delta Y20 \mu\text{m}, F8, S187$	0.8
wheel	6	$\Delta Y15 \mu\text{m}, F8, S123$	0.5
	5	$\Delta Y10 \mu\text{m}, F8, S187$	0.5

5.2 砂轮型号对四角高度差的影响

选择三种不同型号的砂轮 D90[#]、D45[#]、D15[#] 进行磨削试验,由于砂轮的切削能力不同,在采用相同的进给量、进给速度,结果产生不同的四角高度差,磨削试验结果如表 2 所示。对于不同粒度的切削砂轮,由于切削性能不同,四角塌边误差出现不同的变化,D90[#] 砂轮属于半精磨工序,切削能力相对 D45[#]、D15[#] 较强,在相同的磨削深度的参数下,四角塌边误差较小,对于 D15[#] 砂轮,属于精磨和抛光加工,切削力不足,所以,四角塌边误差反而比 D90[#] 大。

表 2 不同砂轮型号磨削结果

Table 2 Grinding results of abrasion wheel fixing at different models

Size of abrasion wheel	Grinding parameters	$a/\mu\text{m}$
D90 [#]	$\Delta Y4 \mu\text{m}, F8, S187$	0.3
D45 [#]	$\Delta Y4 \mu\text{m}, F8, S187$	0.4
D15 [#]	$\Delta Y4 \mu\text{m}, F4, S157$	0.5

5.3 磨削深度对四角塌边误差的影响

通过进行不同的磨削深度试验,可以确定磨削

量与砂轮型号的匹配关系,进而得到合理的加工余量的工艺分配,试验结果如表3所示。磨削深度在15 μm 时,砂轮15 $\#$ 切削力不如砂轮45 $\#$,磨削深度在5 μm 时,二者造成的四角塌边误差基本一致,所以选择D45 $\#$ 砂轮进行精磨,磨削深度应该大于5 μm ,选择D15 $\#$ 进行精磨和抛光加工,磨削深度应该小于5 μm 。

表3 不同磨削深度的磨削试验结果

Table 3 Grinding results of different depths

Size of abrasion wheel	Grinding parameters	$a / \mu\text{m}$
D45 $\#$	$\Delta Y 20 \mu\text{m}, F8, S187$	0.8
	$\Delta Y 15 \mu\text{m}, F8, S187$	0.5
	$\Delta Y 5 \mu\text{m}, F8, S187$	0.4
D15 $\#$	$\Delta Y 15 \mu\text{m}, F8, S187$	0.9
	$\Delta Y 5 \mu\text{m}, F8, S187$	0.5
	$\Delta Y 2 \mu\text{m}, F8, S187$	0.2

根据试验结果,可以确定方形光学元件加工结构及部分磨削工艺参数:砂轮采用前置的砂轮轴磨削系统结构,粗磨选用D90 $\#$ 砂轮,切削深度从50 μm 逐渐减小为15 μm ,然后选用D45 $\#$ 砂轮,进行半精磨和精磨,切削深度从15 μm 逐渐减小为5 μm ,最后选用D15 $\#$ 砂轮进行精磨和抛光,磨削深度为小于5 μm 。

磨削340 mm \times 340 mm非球面光学元件的结果为:四角高度差小于等于0.2 μm ,整体面形精度小于等于3 μm ,粗糙度 $R_a \leq 0.05 \mu\text{m}$,为后续抛光加工提供良好的基体,提高了加工流程的效率。

6 结 论

通过对设备结构、砂轮轴系与转台前置、居中两种不同安装方式的磨削系统的刚度分析、计算,在自行研制的超精密磨床上进行了方形光学元件的磨削试验,通过对试验结果的分析,完成了结构优化,确定了合理的砂轮轴系安装方式,为高精度、高效率磨削提供了试验基础;通过对方形光学元件产生四角塌边误差的原因分析与不同磨削工艺参数的磨削试验,最终选择了D90 $\#$ 、D45 $\#$ 与D15 $\#$ 砂轮的磨削工序组合,确定了工件轴、进给量和磨削深度,形成了合理的磨削工艺参数,保证了磨削精度和效率,得到了良好的磨削效果。

通过理论分析与试验研究,设计了非球面光学元件砂轮轴磨削系统,并确定了磨削工艺参数,使磨削系统具有精度高,效率高,编程简便,运行平稳等优点,可以为光学元件加工工序及加工工艺的调整、改善提供技术支撑。

参 考 文 献

- Chen Jianping, Shen Chenglin. Model and control technology for machining large-diameter optical aspheric mirror[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(12): 1705~1709
陈建平, 沈成林. 大口径非球面镜加工建模与控制技术[J]. *中国激光*, 2007, **34**(12): 1705~1709
- Luo Songbao, Zhang Jianming. Ultra-precision machining equipment and technology of aspheric optics [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2003, **11**(1): 75~78
罗松保, 张建明. 非球面曲面光学零件超精密加工装备与技术[J]. *光学精密工程*, 2003, **11**(1): 75~78
- Zhu Jianyong, Pan Weiqing. Measurement of aspheric surface [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, **47**(1): 011202
朱建勇, 潘卫清. 非球面面形测量技术[J]. *激光与光电子学进展*, 2010, **47**(1): 011202
- Zhao Wenchuan, Su Xianyu, Liu Yuankun *et al.*. Testing an aspheric mirror based on phase measuring deflectometry [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(5): 1338~1341
赵文川, 苏显渝, 刘元坤等. 基于相位偏折术的非球面镜检测方法[J]. *中国激光*, 2010, **37**(5): 1338~1341
- Cheng Mingjun, Zhang Feihu, Dong Shen. Study on ultra-precision grinding machining of optical aspheric surface [J]. *Optical Technique*, 2001, **27**(6): 512~515
陈明君, 张飞虎, 董申. 光学非球曲面器件的超精密磨削加工技术研究[J]. *光学技术*, 2001, **27**(6): 512~515
- X. Chen, W. B. Rowe, R. Cai. Precision grinding using CBN wheels [J]. *International Journal of Machine Tools & Manufactuer*, 2002, **42**(5): 585~593
- Pan Junhua. The Aspheric Design, Processing and Testing[M]. Beijing: Science Press, 1994
潘君骅. 光学非球面的设计、加工与检验[M]. 北京: 科学出版社, 1994
- Xu Feng, Li Qingxiang. The Precision Machine Design[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005
徐峰, 李庆祥. 精密机械设计[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005
- Yang Xiaofan, Guo Yinbiao, Lin Feilong. Modeling and experimentation of ultra-precision grinding of aspherical system [J]. *Machine Tool & Hydraulics*, 2005, **33**(10): 17~20, 58
杨小璠, 郭隐彪, 林飞龙. 超精密非球面磨削实验系统建模及实验[J]. *机床与液压*, 2005, **33**(10): 17~20, 58
- Gai Yuxian, Dong Shen. Technique for key components of machine tool for ultra-precision machining [J]. *Manufacturing Technology & Machine Tool*, 2000, **1**: 7~10
盖玉先, 董申. 超精密加工机床的关键部件技术[J]. *制造技术与机床*, 2000, **1**: 7~10
- Sun Xueyun, Luo Songbao. The optimization calculation of load capacity and stiffness for contra positive hydrostatic pocket of hydrostatic slide [J]. *Aviation Precision Manufacturing Technology*, 2005, **41**(1): 14~16
孙学贇, 罗松保. 液体静压导轨对置油垫承载能力及刚度的优化设计[J]. *航空精密制造技术*, 2005, **41**(1): 14~16
- Lu Huayang, Sun Shouqun. FEA on the oil film of the hydrostatic slider [J]. *Machine Tool & Hydraulics*, 2007, **35**(10): 46~49
卢华阳, 孙首群. 液体静压导轨支承油膜的有限元分析[J]. *机床与液压*, 2007, **35**(10): 46~49
- Machine Design Handbook Writing Group, Machine Design Handbook[M]. Beijing: China Machine Press, 1997
机床设计手册编写组, 机床设计手册[M]. 北京: 机械工业出版社出版, 1997