

文章编号 1004-924X(2009)08-1859-06

高精度光学表面磁流变修形

石峰,戴一帆,彭小强,宋 辞

(国防科学技术大学 机电工程与自动化学院,湖南 长沙 410073)

摘要:系统研究了确定性磁流变抛光高精度光学表面的关键技术及应用。介绍了自行研制的 KDMRF-1000F 磁流变抛光机床及其基本工作原理,给出了抛光过程中建立材料去除模型的两种方法和如何根据驻留时间完成路径规划的过程。采用 KDMRF-1000F 磁流变抛光机床和 KDMRW-1 水基磁流变抛光液对直径 80 mm 的 K4 材料平面反射镜和直径 145 mm 的 K9 材料球面反射镜进行修形实验。实验显示,样件一面形收敛到 PV 值 55.3 nm, RMS 值 5.5 nm; 样件二面形收敛到 PV 值 40.5 nm, RMS 值 5 nm; 样件的表面粗糙度均有显著改善。结果表明,磁流变修形技术具有高精度、高效率、高表面质量的特点。

关键词:磁流变抛光;磁流变液;高精度光学表面

中图分类号:TQ171.684;TH161 **文献标识码:**A

Magnetorheological finishing for high-precision optical surface

SHI Feng, DAI Yi-fan, PENG Xiao-qiang, SONG Ci

(College of Mechatronics Engineering and Automation,
National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: A novel deterministic sub-aperture magnetically assisted polishing method, Magnetorheological Finishing (MRF), was explored and some fundamental principles and key problems in MRF process were researched. The KDMRF-1000F MRF polishing machine developed by our group was introduced and two methods to establish the material removing model in polishing process were given. Then, how to realize a path planning based on dwell time was described. By using the KDMRF-1000F MRF polishing machine and KDMRW-1 water based MR fluid, one K4 flat work piece (80 mm in diameter) and one K9 sphere work piece (145 mm in diameter) were polished, experiments show that work piece one has a peak-to-valley (PV) value of 55.3 nm and a root-mean-square (RMS) value of 5.5 nm; and work piece two has a PV value of 40.5 nm and a RMS of 5 nm, which indicates that the surface roughnesses of two work pieces have been improved obviously. It is concluded that the MRF has the abilities to produce optical surfaces with high form accuracy, surface roughnesses and high efficiencies.

Key words: Magnetorheological Finishing (MRF); MR fluid; high-precision optical surface

收稿日期:2008-12-01;修订日期:2009-02-04.

基金项目:国家自然科学基金重点资助项目(No. 50535020);国家自然科学基金资助项目(No. 50875256);部委级基金资助项目(No. 9140A18070108KG0147)

1 引言

现代光学系统对光学元件的形状精度、表面质量、亚表面质量、残余应力等性能指标的要求日益提高,传统光学加工方法已很难适应现代光学制造的需求。磁流变抛光技术作为一种新型的先进光学制造技术,具有高效率、高精度、高表面质量、亚表面损伤小、表面残余应力小等一系列优点,具有良好的应用前景^[1]。

磁流变抛光技术是由美国 Rochester 大学 COM 光学加工中心首创,由美国 QED 公司完成产品化的新一代光学元件高精度抛光加工方法^[2]。该抛光方法是智能材料、电磁学、流体力学、分析化学等理论在光学抛光领域的集中应用。该方法通过控制外加的梯度磁场改变智能材料——磁流变液的粘度与剪切屈服强度,在抛光轮表面形成一个形状可控、“硬度”可调、粘度可变的可控聚束能量流,以该聚束能量流为“柔性抛光模”来实现光学零件的高精度抛光。磁流变抛光技术具有以下优点^[3]:(1)可以完成光学表面的高精度抛光。采用磁流变抛光方法,光学表面(平面、球面、非球面等)面形精度(PV)可达 $\lambda/20$ 以下,表面粗糙度可达 1 nm 以下。(2)磁流变抛光过程的材料去除机理是以剪切力为主、压力为辅,磨料颗粒对光学表面的物理损伤程度小,表面残余应力小,光学表面基本无亚表面损伤层。(3)磁流变抛光以聚束能量流的形式完成抛光过程,抛光区域温度上升不明显,不存在传统抛光方法的抛光头磨损,抛光过程不可控等一系列问题。(4)理论上,磁流变抛光方法不受抛光工件几何形状、外形尺寸大小等限制,可完成任何面形的光学零件抛光。

2 磁流变抛光关键技术

自行研制的磁流变抛光机床 KDMRF-1000F 及其基本原理,如图 1 所示。磁流变液在蠕动泵的作用下从喷嘴喷出,由旋转抛光轮带入抛光区域,在梯度磁场(由抛光轮内的电磁铁产生)的作用下形成可控的柔性抛光模,完成材料去

除后进入回收装置,经过滤搅拌后连续循环。

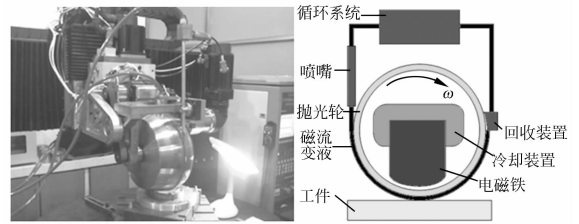


图 1 磁流变抛光样机及其原理图
Fig. 1 MRF experimental equipment

2.1 磁流变液研制及其性能测试

磁流变抛光液在外加梯度磁场的作用下,在抛光轮表面形成“柔性抛光模”,对光学元件表面进行材料去除。典型的磁流变液由微米级的磁性微粒、非磁性载液、稳定剂等成份组成。不加磁场时,磁流变液与牛顿流体相似;在外加磁场的作用下,磁流变液可于瞬间(毫秒级)转变为 Bingham 流体;当撤去外磁场后,磁流变液可立即恢复原状^[4]。国外对配制磁流变液的关键技术严格保密,国内尚无成熟产品。自主开发磁流变液的配置及测试技术是发展磁流变抛光技术的前提和基础。

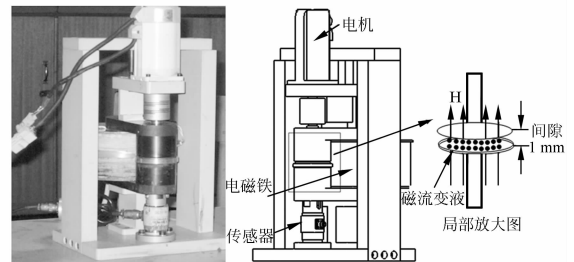


图 2 磁流变液流变性测试仪
Fig. 2 A novel rheometer for MRF fluids

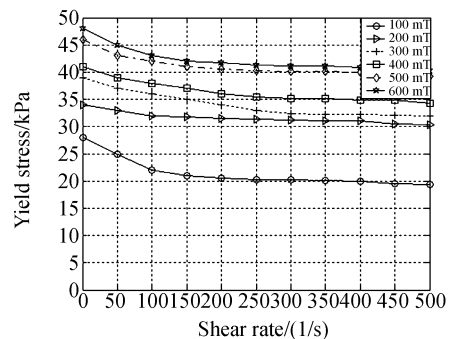


图 3 KDMRW-1 水基磁流变液的剪切屈服强度
Fig. 3 Yield stress of KDMRW-1 water based MR fluids

如图 2,自主开发的磁流变液流变性能测试仪,可以测试磁流变液在磁流变抛光工作方式下的流变学性能。如图 3,水基磁流变抛光液 KDMRW-1 的剪切屈服强度测试结果。

2.2 建立材料去除模型

磁流变抛光过程采用计算机控制光学表面成形(CCOS)的工艺方法,首先需要确定材料去除模型,再根据选定的驻留时间计算方法,计算出驻留时间并完成路径规划,然后通过数控机床完成加工过程。所以,获取材料去除模型是磁流变抛光的前提和基础。目前获取材料去除模型的方法主要有实验法和数学建模法^[5]。实验法由于受到制作工艺繁琐、制作时间长、制作样片材料一致性等因素的限制,其应用具有一定的局限性,但建立的模型准确性较高;数学建模法操作简单,不受样片材料限制,尤其在理论分析方面具有良好的前景,但仿真模型的准确性与实验法有一定差距。在实际应用中,逐步积累、对比实验法和数学建模法获取的去除模型,可以形成具有一定规模的去除模型数据库,应用该数据库既可以提高模型的准确性,又可以提高模型的制作效率,降低模型的制作成本。下面分别介绍这两种模型制作方法。

2.2.1 实验法建立材料去除模型

如图 4,实验法建立材料去除模型的基本方法是差动法。主要步骤包括:测量用于制作去除模型的材料样片(要求与目标工件的材料严格一致)的初始面形,一般要求其面形误差 PV 值 < $\lambda/4$;控制磁流变抛光模在位置 1~4 依次驻留一定时间,则会产生一定的材料去除量;再次测量材料样片的面形,并与初始面形测量数据进行差动法处理,根据差动处理得到的材料去除量来计算

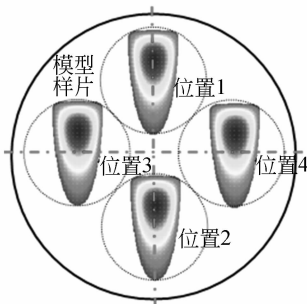


图 4 实验法建立去除模型原理图

Fig. 4 Experimental method to establish polishing spot

材料去除模型。机械定位精度、样片位姿调整精度、样片测量一致性以及后续处理软件的误差修正能力是影响材料去除模型准确性的关键因素。

2.2.2 数学建模法建立材料去除模型

由于磁流变液的 Bingham 流体特性^[6],抛光区域磁流变液的成核状态、压力场、剪切应力场、速度场的计算十分困难。抛光区域的磁流变液可采用修正的二维雷诺方程来描述^[7],采用数值迭代的方法进行求解,图 5 为抛光区域工件表面的压力场、剪切应力场分布。由于磁流变抛光的材料去除机理是剪切力、压力共同作用^[8],可以根据计算出的剪切应力场、压力场分布并结合材料的

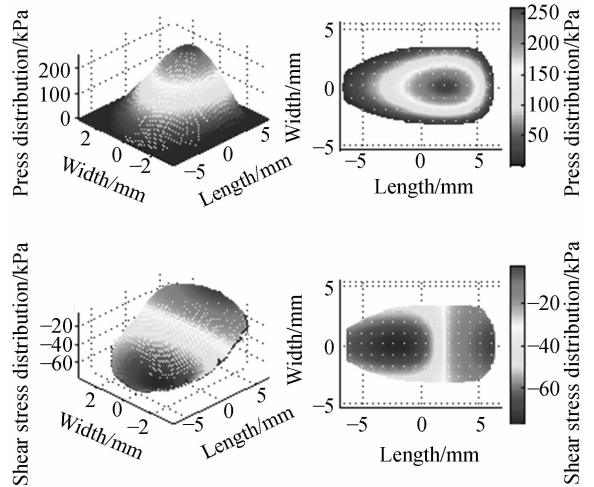


图 5 抛光区域工件表面的压力场、剪切应力场分布
Fig. 5 Shear stress, press distribution in polishing area

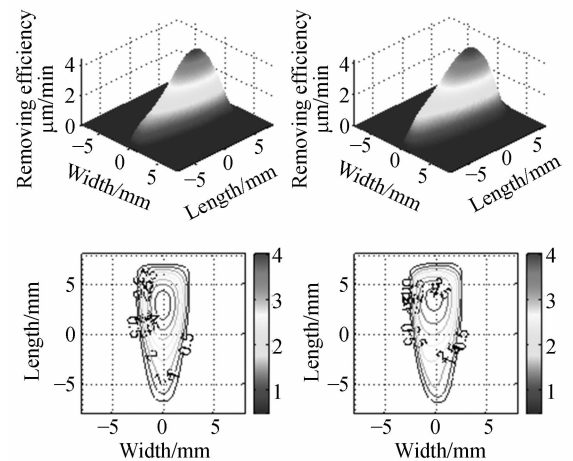


图 6 模型结果与实验结果对比图
Fig. 6 Comparison between theoretical and experimental results

实际去除情况,确定剪切应力、压力对材料去除的影响能力,最终建立磁流变抛光材料去除模型。图 6 为建立的磁流变去除模型仿真结果与实验结果的对比图,可见两者在影响范围、变化趋势、去除效率数值上基本相符,其中峰值去除效率的偏差约为 3%,体积去除效率的偏差约为 8%。

2.3 驻留时间算法

如图 7,将工件沿半径方向和圆周方向分别进行离散式网格划分。半径方向离散间隔为 δ ,圆周方向离散间隔为 $\delta\theta$ 。定义控制节点 $p_{i,j}$ 是半径为 r_i ,圆周角度为 θ_j 的位置。驻留时间算法就是求解驻留时间向量 t (磁流变抛光模在各个控制节点上的驻留时间),使得各个控制节点的高度去除量尽量接近高度余量^[9]。

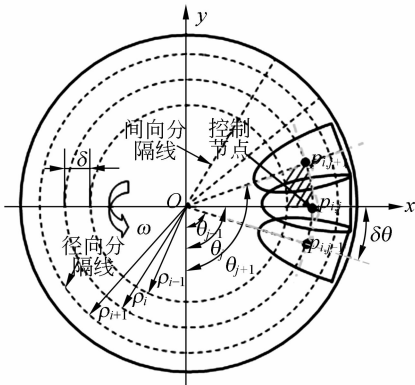


图 7 磁流变抛光路径规划

Fig. 7 Path planning for MRF process

定义残留误差向量 $e = [e_1, \dots, e_i, \dots, e_c]^T$, 其中 e_i 为第 i 个控制节点的残留误差,则有:

$$\|e\| = \|h - F \cdot t\|, \quad (1)$$

式中, h 为控制节点的高度余量向量, F 为去除效率矩阵,则求解驻留时间的过程即为寻找最优解 t^* ,使得式(1)取得最小值。由于向量 h 、 t 和矩阵



图 8 驻留时间计算结果

Fig. 8 Result of dwell time

F 都是非负的,可以采用非负最小二乘法 NNLS (Nonnegative Least Squares) 进行求解,使得范数 $\|e\|$ 达到最小值。

对于文章 3.2 中的球面加工实例,采取半径方向间隔 2 mm,圆周方向间隔 2° 的控制节点网格,则驻留时间的计算结果如图 8 所示。

3 磁流变抛光技术应用实例

平面镜和球面镜是具有代表性的光学元件,采用自行开发的磁流变抛光机床 KDMRF-1000F 对上述两类光学元件进行了抛光实验。具体试验条件为:磁流变抛光液型号 KDMRW-1,磨料 CeO_2 ,抛光轮半径 150 mm,抛光轮转速 120 rpm,磁场电流 6 A,抛光轮与工件间隙 1.0 mm。平面镜的基本参数为:材料 K4 光学玻璃,直径 80 mm;球面镜的基本参数为:材料 K9 光学玻璃,直径 145 mm,相对口径 1:1.6。测试仪器为 Zygo 干涉仪和轮廓仪。采用的磁流变抛光工艺流程如图 9 所示。

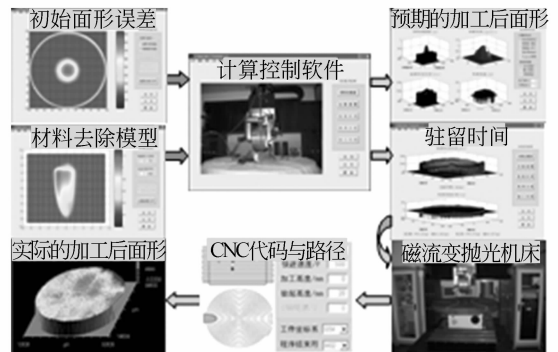


图 9 磁流变抛光工艺流程图

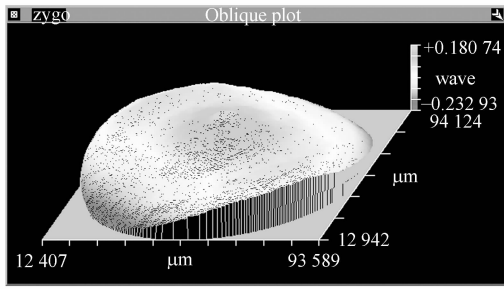
Fig. 9 Diagram for MRF process

3.1 平面镜加工实例

图 10,11 分别为加工前、后平面镜的面形和表面粗糙度测量结果。可见,经过磁流变抛光加工后,平面镜面形 PV 值从 261.7 nm 提高到 55.3 nm(约为),面形 RMS 值从 46.8 nm 提高到 5.5 nm(约为),表面粗糙度 R_a 值从 1.58 nm 提高到 0.57 nm。

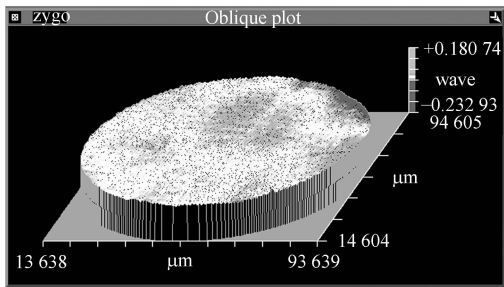
3.2 球面加工实例

图 12,13 分别为加工前、后球面镜面形和表



(a)加工前

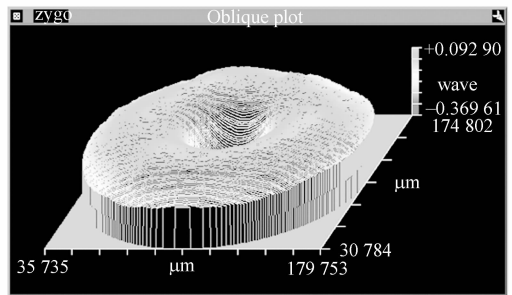
(a)Before polishing



(b)加工后

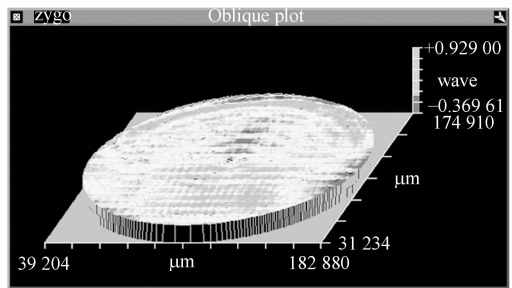
(b)After polishing

图 10 磁流变加工前、后平面镜面形误差测试结果图
Fig. 10 Form error of flat surface before and after MRF polishing



(a)加工前

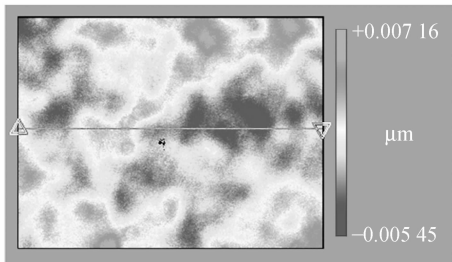
(a)Before polishing



(b)加工后

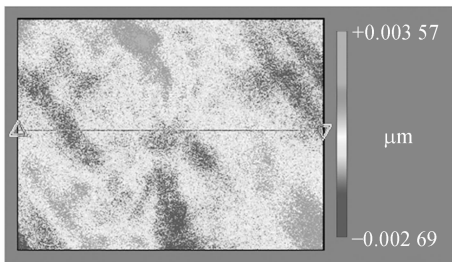
(b)After polishing

图 12 磁流变加工前、后球面镜面形误差测试结果图
Fig. 12 Form error of spherical surface before and after MRF polishing



(a)加工前

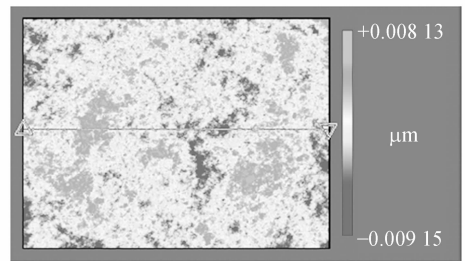
(a)Before polishing



(b)加工后

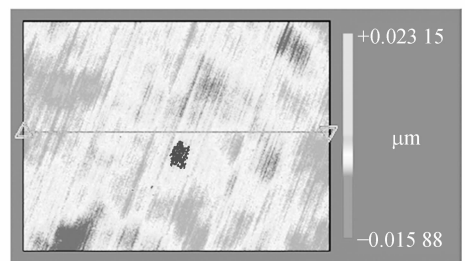
(b)After polishing

图 11 磁流变加工前、后平面镜表面粗糙度测试结果图
Fig. 11 Surface roughness of flat surface before and after MRF polishing



(a)加工前

(a)Before polishing



(b)加工后

(b)After polishing

图 13 磁流变加工前、后球面镜面形误差测试结果图
Fig. 13 Surface roughness of spherical surface before and after MRF polishing

面粗糙度测量结果。可见,经过磁流变抛光加工后,球面镜面形 PV 值从 293 nm 提高到 40.5 nm(左右),面形 RMS 值从 48 nm 提高到 5 nm(左右),表面粗糙度 R_a 值从 1.75 nm 提高到 1.28 nm。

4 结 论

磁流变抛光技术具有加工效率高、加工光学表面质量高、表面损伤小等一系列优点,是大中型光学表面的热点加工方法。目前的实验条件下,平面加工精度可达 PV 55.3 nm, RMS 5.5 nm, R_a 0.57 nm;球面加工精度可达 PV 40.5 nm, RMS 5 nm, R_a 1.28 nm。

磁流变抛光技术的适用范围十分广泛,不仅

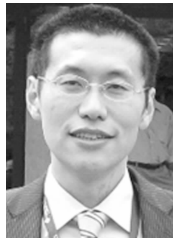
可适用于平面、球面、非球面、抛物面的高精度抛光,甚至可以完成离轴镜、扇形镜、六边形镜等异形镜的加工。磁流变抛光技术适用于各种口径(小型、中型、大型)的光学表面加工。目前,自行开发的 KDMRF-1000F 磁流变抛光机床能完成 1 m 以下光学表面的高精度抛光,大型光学表面(口径 <4 m)抛光用磁流变抛光机床正在研制中。磁流变抛光技术还可用于轻质薄型镜和光学表面质量的二次提升。此外,磁流变抛光技术可与多种其它研磨、抛光技术混合应用,兼容性强,如与可控弹性柔体(能动盘、能动支撑工件)研抛技术、离子束抛光技术相结合,可以实现大型非球面光学表面的高效、低耗、高精度、高表面质量、低表面损伤加工。

参考文献:

- [1] SHOREY A B. Mechanism of material removal in magnetorheological finishing of glass[D]. *Ph. D Dissertation of University of Rochester*, 2000.
- [2] KORDONSKI W I, GOLINI D. Multiple application of magnetorheological effect in high precision finishing[J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2002,13:401-402.
- [3] DEGROOTE J E. Surface interactions between nanodiamonds and glass in magnetorheological finishing (MRF)[D]. *Ph. D Dissertation of University of Rochester*, 2007.
- [4] KORDONSKI W I. Magnetorheological effect as a base of new devices and technologies[J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Mat*, 1993,122:395-398.
- [5] TICHY J A. Hydrodynamic lubrication theory for the bingham plastic flow model[J]. *Journal of Rheology*, 1991,34:477-495.

- [6] 张峰,张斌智. 磁流体辅助抛光工件表面粗糙度研究[J]. *光学精密工程*, 2005,13(1):34-38.
ZHANG F, ZHANG B ZH. Surface roughness of optical elements fabricated by magnetic fluid-assisted polishing [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13 (1):34-38. (in Chinese)
- [7] 尤伟伟,彭小强,戴一帆. 磁流变抛光液的研究[J]. *光学精密工程*, 2004,12(3):330-334.
YOU W W, PENG X Q, DAI Y F. MR fluids for finishing use[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2004, 12 (3):330-334. (in Chinese)
- [8] 张峰,余景池,张学军,等. 磁流变抛光技术[J]. *光学精密工程*, 1995,7(5):1-7.
ZHANG F, YU J CH, ZHANG X J, *et al.*. Magnetorheological finishing technology[J]. *Opt. Precision Eng.*, 1995, 7(5):1-7. (in Chinese)
- [9] LEE H, YANG M Y. Dwell time algorithm for computer-controlled polishing of small axis-symmetrical aspherical lens mold[J]. *Opt. Eng.*, 2001, 40(9):1936-1943.

作者简介:



石 峰(1980—),男,辽宁人,国防科技大学和德国不莱梅大学联合培养博士研究生,主要从事光学精密工程与计算机控制,磁流变抛光技术等方面的研究。E-mail: sf.wind@yahoo.com



戴一帆(1966—),男,江苏南京人,博士,教授,1988年于国防科技大学获得学士学位,1995年于莫斯科航空学院获博士学位,主要研究方向为精密工程与计算机控制。E-mail: dyf@nudt.edu.cn



彭小强(1977—),江西宁都人,国防科技大学副教授,主要研究方向为精密工程和先进光学制造。E-mail: pxq@sina.com.cn

宋 辞(1983—)四川人,博士研究生,主要研究方向为精密工程。E-mail: sunicris@163.com