

# 连续进动气囊抛光行间距优化及实验研究

金明生 计时鸣 张 利 陈伟强 蒋鑫鑫

浙江工业大学特种装备制造与先进加工技术教育部/浙江省重点实验室,杭州,310032

**摘要:**为提高和调控模具加工质量,针对行切法连续进动气囊抛光的行间距优化问题进行了仿真分析和实验研究。在取得优化进给速度和叠加次数的基础上,兼顾抛光效率与抛光效果,运用二分法原理,通过 MATLAB 仿真分析了行间距对气囊抛光材料去除特性的影响,获得了优化行间距  $D=8.2\text{mm}$ 。基于建立的连续进动气囊抛光离线规划原型系统进行了实验对比验证,实验结果与仿真结果吻合。

**关键词:**连续进动;气囊抛光;行间距;离线规划;优化

**中图分类号:**TG580.692

**DOI:**10.3969/j.issn.1004-132X.2013.07.003

## Line Spacing Optimization and Experimental Research of Gasbag Polishing with Continuous Precession

Jin Mingsheng Ji Shiming Zhang Li Chen Weiqiang Jiang Xinxin

Key Laboratory of Special Purpose Equipment and Advanced Manufacturing Technology, Ministry of Education & Zhejiang Province, Zhejiang University of Technology, Hangzhou, 310032

**Abstract:** In order to improve and control mould quality, simulation analysis and experimental research on line spacing optimization of gasbag polishing were made with continuous precession by line cutting method. On the basis of gaining the optimal feed rate and superposition times, simulation analysis of the effect on material removal characteristics of gasbag polishing regarding line spacing was carried out under MATLAB. Both the polishing efficiency and polishing quality were considered, and dichotomy theory was applied. Then, the optimal line spacing  $D=8.2\text{mm}$  was obtained. Finally, the simulation tallies well with experimental result, which are carried out on the established off-line planning prototype system of gasbag polishing with continuous precession.

**Key words:** continuous precession; gasbag polishing; line spacing; off-line planning; optimization

## 0 引言

应用于模具自由曲面的新型气囊抛光技术与

自由曲面有很好的顺从性和贴合性,能获得稳定的材料去除特性和高质量的抛光表面<sup>[1-4]</sup>。气囊抛光方式有多种,其中,进动抛光方式能得到近似高斯分布的影响函数,且能改变抛光轨迹的方向,获得高品质光滑表面<sup>[5-7]</sup>。文献[8-10]将气囊进动抛光方式应用于玻璃,对进动模型、去除函数和

收稿日期:2012-02-06

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50575208,51175471);浙江省自然科学基金资助项目(M503099,LQ12E05014)

[2] 上官文斌,徐驰. 汽车悬架控制臂液压衬套动态特性实测与计算分析[J]. 振动与冲击,2007,26(9):7-10.

Shangguan Wenbin, Xu Chi. Experiment and Calculation Methods for Analyzing Dynamic Performances of Hydraulic Bushings Used in Control Arms of a Suspension [J]. Journal of Vibration and Shock,2007,26(9):7-10.

[3] Lu M, Ari-Gur J. Study of Dynamic Properties of Automotive Hydrobushing [J]. Advanced Vehicle Technologies, ASME Proc., DE, 2000, 106: 135-140.

[4] Gil-Negrete N. Predicting the Dynamic Behaviour of Hydrobushings[J]. Shock and Vibration, 2002, 12: 91-107.

[5] Svensson M, Hakansson M. Hydrobushing Model

for Multibody Simulations[D]. Lund, Sweden: Lund University, 2004.

[6] Azenha A, Mschado J A T. On the Describing Function Method and the Prediction of Limit Cycles in Nonlinear Dynamical Systems[J]. SAMS, 1998, 33: 307-320.

[7] Piquet B, Maas C, Capou F. Next Generation of Suspension Bushings: Review of Current Technologies and Expansion upon New 3rd Generation Product Data[J]. SAE Paper, 2007-01-0850, 2007.

(编辑 苏卫国)

**作者简介:**马天飞,男,1970年生。吉林大学汽车工程学院教授。研究方向为汽车 NVH 性能分析与控制。刘亚川,男,1985年生。吉林大学汽车工程学院硕士研究生。乔雷冰,男,1987年生。吉林大学汽车工程学院硕士研究生。王彦会,男,1976年生。吉林大学汽车工程学院博士研究生。

驻留时间控制算法等进行了研究。

在其他抛光工艺参数一定的条件下,进给速度、叠加次数和行间距等是影响模具型面抛光效率和抛光质量的重要参数。本文基于课题组前期在优化进给速度和叠加次数方面的研究成果,进一步针对行切法连续进动气囊抛光的行间距优化问题进行仿真分析和实验研究。本文的研究工作既考虑了抛光效率又兼顾了抛光效果。优化行间距的获得有助于指导抛光工艺组合参数的合理选取;建立连续进动气囊抛光离线规划原型系统便于进行不同抛光工艺组合参数下的对比实验,有助于建立原型工艺系统和验证仿真结果的正确性。

## 1 连续进动气囊抛光

如图 1 所示,气囊抛光工具旋转轴  $P$  与模具型面接触中心法线  $N$  成角度  $\theta$ ;气囊绕旋转轴  $P$  以角速度  $\omega_1$  自转,使接触区任意一点的运动轨迹即切削方向保持一致;气囊绕中心法线  $N$  以角速度  $\omega_2$  公转以改变接触区任意一点的切削方向;气囊抛光工具按指定的轨迹以一定进给速度  $v$  运动,使模具型面上的任意一点得到加工,且进给速度  $v$  直接影响接触区任意一点的驻留时间,进给速度越小,驻留时间越长;叠加次数  $n$  和行间距  $D$  共同影响接触区的材料去除特性。通过气囊抛光工具的直流电机和与该抛光工具相连接的机器人联合控制上述各运动变量,在气囊一定下压量和充气压力条件下,依靠磨粒的微切削作用对模具型面进行抛光,可获得高品质表面。

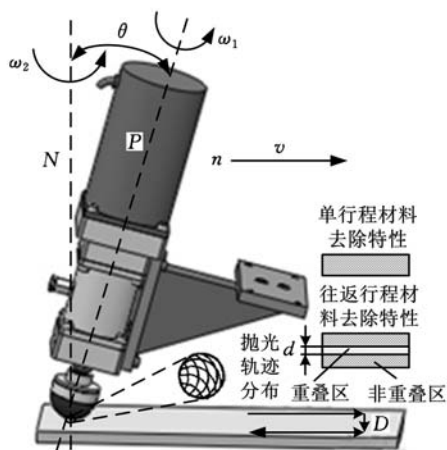


图 1 连续进动气囊抛光示意图

## 2 行间距对材料去除特性影响的仿真分析

行切法连续进动气囊抛光的重要参数是行间距  $D$ ,如图 1 所示。行间距  $D$  取值过大,重叠区

宽度  $d$  过小,虽提高了抛光效率,但重叠区的材料去除量较小,不利于补偿材料去除的均匀性,降低了抛光效果;行间距  $D$  取值过小,不但降低了抛光效率,而且重叠区的去除量较大,同样不利于补偿材料去除的均匀性,降低了抛光效果。合适的行间距  $D$  选取应以取值尽可能大且重叠区的去除量与非重叠区的去除量之差尽可能小为原则,既考虑抛光效率又兼顾抛光效果。

本文以气囊倾角  $\theta = 20^\circ$ 、姿态偏转角  $\alpha_0 = 0^\circ$  (旋转轴  $P$  与中心法线  $N$  确定的平面与进给速度  $v$  矢量方向的夹角,  $0^\circ$  表示气囊倾角的水平投影正方向与进给速度矢量方向重合)、自转角速度  $\omega_1 = 104.7 \text{ rad/s}$ 、公转角速度  $\omega_2 = 0.52 \text{ rad/s}$ 、气囊半径  $R = 20 \text{ mm}$ 、下压量  $h = 2 \text{ mm}$ 、充气压力  $p = 0$  为基本工艺条件,在取得优化进给速度  $v = 0.7 \text{ mm/s}$  和叠加次数  $n = 3$  的基础上,运用二分法原理,进行行间距优化问题研究。

上述仿真条件下的单行程连续进动气囊抛光接触区宽度为  $10 \text{ mm}$ 。首先选择行间距  $D_{\max} = 10 \text{ mm}$  为最大临界值,根据二分法原理选取  $D_{\text{mid}1} = 5 \text{ mm}$ ,再选取  $D_{\text{mid}2} = 7.5 \text{ mm}$ 。通过 MATLAB 进行仿真分析,结果如图 2 所示,图中,横坐标为进动进给方向  $x'$ ,纵坐标为接触宽度方向  $y'$ ,投影色标为材料去除量归一化值。图 2c 的材料去除特性与图 2a 的材料去除特性相近,故选取  $D_{\text{mid}3} = 8.7 \text{ mm}$  (小数点保留一位处理),仿真结果如图 2d 所示。

图 2 中,图 2d 的材料去除均匀性与图 2c 的材料去除均匀性相仿度高,故继续通过二分法原理进行行间距优化,取行间距  $D_{Y1} = 8.1 \text{ mm}$ ,其材料去除特性如图 3a 所示。通过图 3a 发现,此行间距下的材料去除均匀性已比较理想。为提高仿真效率,采用邻域取值方式,分别选取行间距  $D_{Y2} = 8.0 \text{ mm}$ 、 $D_{Y3} = 8.2 \text{ mm}$ 、 $D_{Y4} = 8.3 \text{ mm}$ ,仿真结果如图 3b~图 3d 所示。通过图 3,可得以下结论:

(1) 行间距为  $8.1 \text{ mm}$  时,重叠区过量切削带(图 3a、图 3b 中  $y' = 0$  附近)宽度比行间距为  $8.0 \text{ mm}$  时的重叠区过量切削带宽度约小一半,对应的材料去除均匀性更好,抛光效果更佳。

(2) 行间距为  $8.2 \text{ mm}$  时,重叠区欠切削带(图 3c、图 3d 中以  $y' = 0$  为对称轴的对称区域)宽度比行间距为  $8.3 \text{ mm}$  时的重叠区欠切削带宽度小,对应的抛光效果前者更佳。

(3) 行间距为  $8.1 \text{ mm}$  时的材料去除均匀性和行间距为  $8.2 \text{ mm}$  时的材料去除均匀性相当,

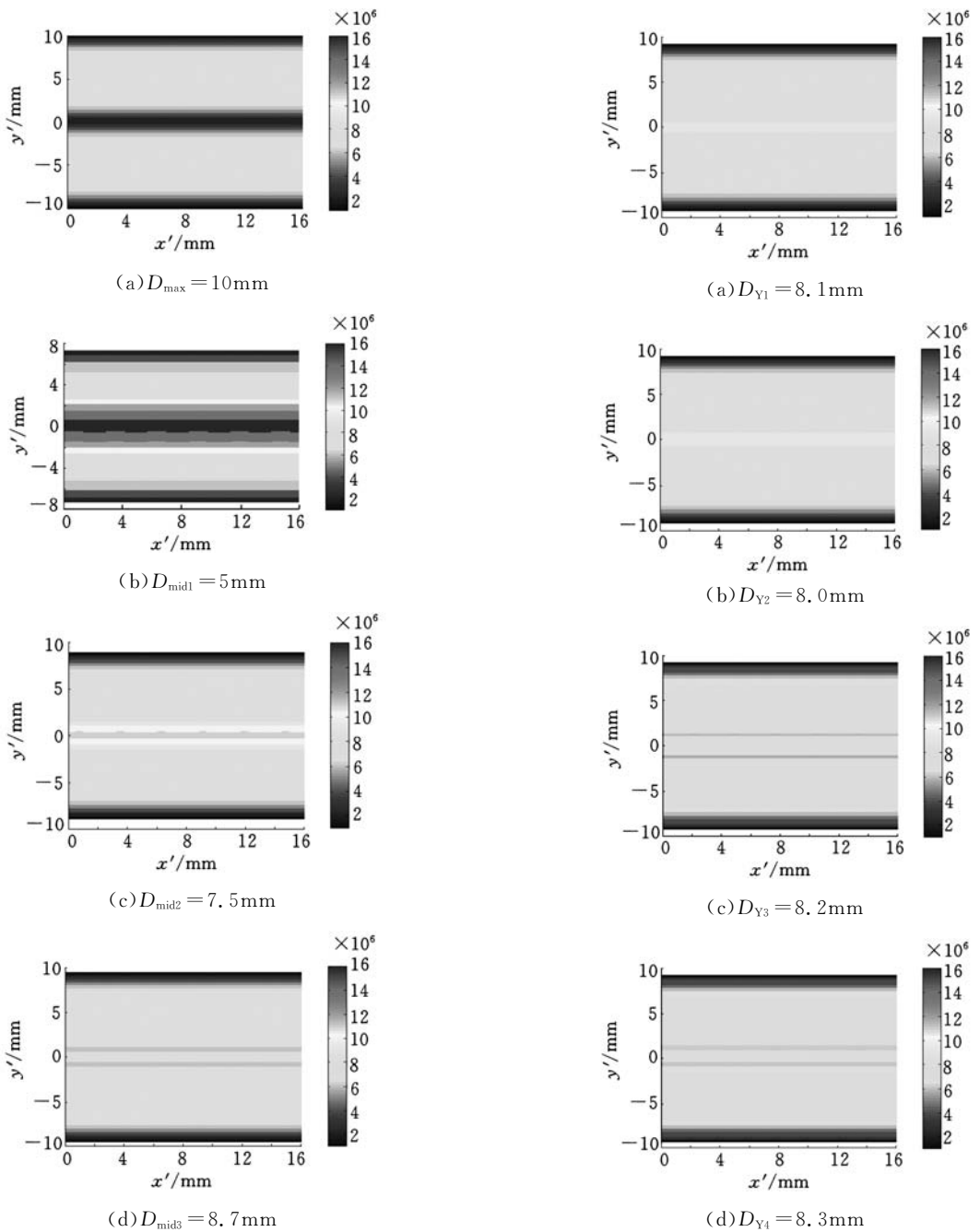


图 2 行间距对材料去除特性的影响

图 3 行间距优化选择

即抛光效果相当。为兼顾抛光效率,行间距尽可能取大,故优选行间距  $D_Y = 8.2\text{mm}$ 。

### 3 连续进动气囊抛光离线规划原型系统

针对六自由度机器人控制气囊抛光工具实现连续进动气囊抛光的需求,根据参数输入和输出的具体设置内容和详细设计流程,建立独立于 MATLAB 环境的连续进动气囊抛光离线规划原型系统,如图 4 所示。

图 4 所示的离线规划原型系统的基本任务包括:①输出格式正确且后缀名为 JBI 的文件;②输出的 JBI 文件必须具备连续进动功能;③能预览输入不同工艺组合参数条件下的切削方向分布和

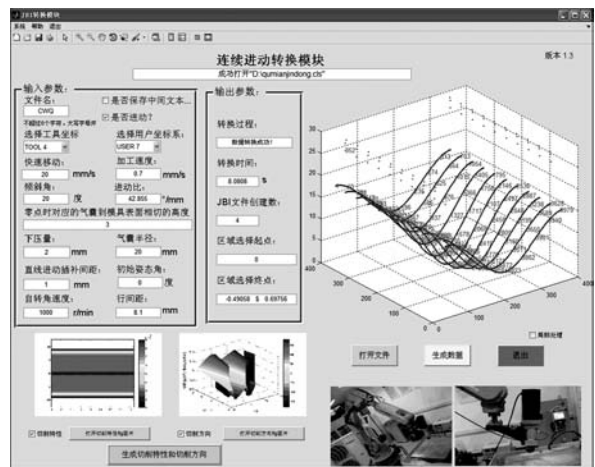


图 4 连续进动气囊抛光离线规划原型系统

材料去除特性仿真效果;④能处理模具局部修正情况。

参数输入和输出的具体设置内容包括:文件名、工具坐标系和用户坐标系的选择、快速移动选项、进给速度、进动比(公转角速度与进给速度比值)、零点定位、直线进动插补间距、初始姿态偏转角、倾斜角、行间距、下压量、气囊半径、转换结果、转换时间、JBI 文件生成数、区域选择起点坐标、区域选择终点坐标等。

详细的设计流程包括以下几方面:①读取 CLSF 文件及生成刀位数据矩阵;②对刀位数据矩阵的球心进行转换处理和插补处理,生成新的刀位数据矩阵;③基于连续进动的运动模型,对新的刀位数据矩阵进行处理;④将包含连续进动特征的刀位数据矩阵转换成六自由度机器人 MOTOMAN-HP20 所能识别的 JBI 文件;⑤根据抛光工艺组合参数的设置预览连续进动气囊抛光切削方向分布和材料去除特性仿真效果;⑥生成独立于 MATLAB 环境的离线规划原型系统,方便快捷使用。

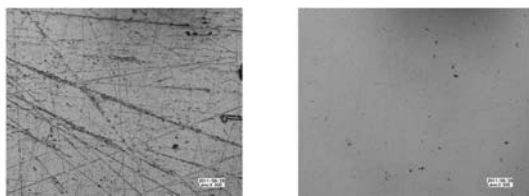
#### 4 行间距对材料去除特性影响的实验研究

根据理论分析结果,利用建立的连续进动气囊抛光离线规划原型系统进行行间距对材料去除特性影响的对比实验研究。实验的基本条件如下:气囊倾角  $\theta=20^\circ$ ,姿态偏转角  $\alpha_0=0^\circ$ ,自转角速度  $\omega_1=104.7\text{rad/s}$ ,公转角速度  $\omega_2=0.52\text{rad/s}$ ,气囊半径  $R=20\text{mm}$ ,下压量  $h=2\text{mm}$ ,充气压力  $p=0$ ,进给速度  $v=0.7\text{mm/s}$ ,叠加次数  $n=3$ ,模具材料 Cr12,人造金刚石磨料 W7。

基于优化进给速度和叠加次数,获得材料去除均匀性较好的单行程材料去除特性。在此基础上,对驻留时间作等化处理,进行一定行间距的往返行程材料去除特性仿真和实验研究。为放大对比效果,行间距  $D$  分别取值为 5mm、8.2mm、10mm,相应的实验结果如图 5~图 8 所示。图 5 所示是在 KEYENCE VHX-600 三维显微镜下放大 500 倍后,对抛光前后模具表面特征的观测结果。图 6~图 8 所示是使用 TR210 粗糙度仪对抛光接触区 25 个特定分布点进行随机角度表面粗糙度采样的检测结果。

上述实验结果表明:

(1)行间距  $D=5\text{mm}$  和行间距  $D=8.2\text{mm}$  时,重叠区的抛光质量都比非重叠区边缘的抛光质量好,很大程度上反映了材料去除效果。



(a)抛光前 (b) $D=8.2\text{mm}$  进动抛光  
图 5 抛光前后模具表面特征对比图

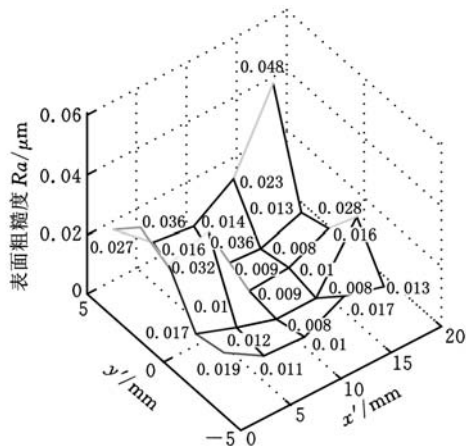


图 6 行间距  $D=5\text{mm}$  的抛光接触区粗糙度分布

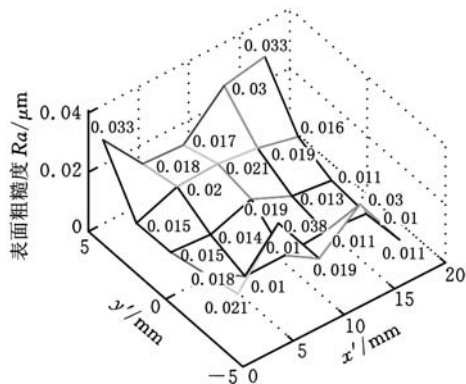


图 7 行间距  $D=8.2\text{mm}$  的抛光接触区粗糙度分布

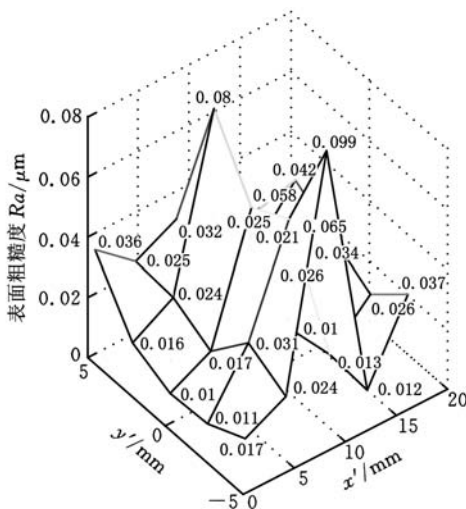


图 8 行间距  $D=10\text{mm}$  的抛光接触区粗糙度分布

(2)对于表面粗糙度分布特征,行间距  $D=8.2\text{mm}$  比行间距  $D=5\text{mm}$  抛光效果好,很大程度上反映了上述仿真结果所显示的  $D=5\text{mm}$  时

重叠区的材料去除量大,  $D=8.2\text{mm}$  时重叠区与非重叠区的材料去除量相当、均匀性好等特征。

(3) 行间距  $D=10\text{mm}$  时, 接触中间区域有明显的材料未去除痕迹, 导致表面粗糙度值大。

(4) 行间距  $D=8.2\text{mm}$  时, 抛光质量稳定且品质高, 说明该优化行间距条件下, 接触区材料去除效果均匀性好, 实验结果与仿真结果吻合。

## 5 结论

(1) 基于优化进给速度和叠加次数, 获得了材料去除均匀性较好的单行程材料去除特性, 进一步仿真分析了行间距参数对往返行程材料去除特性的影响, 得到了特定工艺参数组合条件下的行间距优化值  $D_Y=8.2\text{mm}$ 。

(2) 针对六自由度机器人控制气囊抛光工具实现连续进动气囊抛光的需求, 建立了包括行间距输入参数在内的独立于 MATLAB 环境的连续进动气囊抛光离线规划原型系统。

(3) 基于建立的连续进动气囊抛光离线规划原型系统进行了行间距对材料去除特性影响的对比实验研究, 结果表明, 不同行间距参数下的接触区粗糙度分布特征从本质上反映了行间距对抛光材料去除均匀性的影响水平, 与仿真结果吻合。

## 参考文献:

- [1] 计时鸣, 金明生, 张宪, 等. 应用于模具自由曲面的新型气囊抛光技术[J]. 机械工程学报, 2007, 43(8): 2-6.  
Ji Shiming, Jin Mingsheng, Zhang Xian, et al. Novel Gasbag Polishing Technique for Free-form Mold [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2007, 43(8): 2-6.
- [2] Jin Mingsheng, Ji Shiming, Zhang Li, et al. Effect of Free Abrasive Particle in Gasbag Polishing Technique[J]. Advanced Materials Research, 2009, 69-70: 83-87.
- [3] 金明生. 模具自由曲面气囊抛光机理及工艺研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2009.
- [4] 刘健, 计时鸣. 面向精密抛光的复杂模具曲面三维重构方法[J]. 中国机械工程, 2009, 20(10): 1226-1229.  
Liu Jian, Ji Shiming. Three-dimensional Reconstruction Method for Complex Mold Surface in Precision Polishing System[J]. China Mechanical Engineering, 2009, 20(10): 1226-1229.
- [5] Walker D D, Brooks D, Freeman R, et al. New Developments in the Precessions Process for Manufacturing Freeform, Large-optical, and Precision Mechanical Surfaces[C]//2nd International Symposium on Advanced Optical Manufacturing and Testing Technologies: Large Mirrors and Telescopes. Xian: SPIE, 2005: 51-60.
- [6] Walker D D, Brooks D, Freeman R, et al. The First Aspheric Form and Texture Results from a Production Machine Embodying the Precession Process[C]//Proceedings of SPIE, Optical Manufacturing and Testing IV. San Diego: SPIE, 2001: 267-277.
- [7] Walker D D, Brooks D, King A, et al. The 'Precessions' Tooling for Polishing and Figuring Flat, Spherical and Aspheric Surfaces [J]. Optics Express, 2003, 11(8): 958-964.
- [8] 高波, 谢大纲, 姚英学, 等. 气囊式工具抛光新技术[J]. 光学技术, 2004, 30(3): 333-336.  
Gao Bo, Xie Dagang, Yao Yingxue, et al. New Technology of Ballonet tool for Polishing[J]. Optical Technique, 2004, 30(3): 333-336.
- [9] 高波, 姚英学, 谢大纲, 等. 气囊抛光进动机构的运动建模与仿真[J]. 机械工程学报, 2006, 42(2): 101-104.  
Gao Bo, Yao Yingxue, Xie Dagang, et al. Movement Modeling and Simulation of Precession Mechanisms for Bonnet Tool Polishing[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2006, 42(2): 101-104.
- [10] 张伟, 李洪玉, 于国或. 光学元件超精密气囊抛光关键技术研究现状[J]. 光学学报, 2009, 29(1): 27-34.  
Zhang Wei, Li Hongyu, Yu Guoyu. Current Situation of Ultra-Precision Bonnet Polishing Key Technology of Optical Elements[J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(1): 27-34.

(编辑 苏卫国)

作者简介: 金明生, 男, 1982年生。浙江工业大学机械工程学院讲师。主要研究方向为精密与超精密加工技术。计时鸣, 男, 1957年生。浙江工业大学机械工程学院院长、教授、博士研究生导师。张利(通信作者), 女, 1971年生。浙江工业大学机械工程学院副教授。陈伟强, 男, 1987年生。浙江工业大学机械工程学院硕士研究生。蒋鑫鑫, 男, 1988年生。浙江工业大学机械工程学院硕士研究生。