

doi: 10.7690/bgzd.2014.05.015

环带式磁流变抛光装置设计

陈智利, 杨绍培, 阳志强, 郭忠达, 刘卫国

(西安工业大学陕西省薄膜技术与光学检测重点实验室, 西安 710032)

摘要: 针对“点接触”磁流变抛光技术存在对机床机械结构精度要求高, 需对被抛光表面进行预抛光处理和抛光效率低等问题, 提出一种采用环带式磁流变抛光技术实现平面和球面光学零件抛光的方法。该方法基于“面接触”抛光思想, 采用闭合直流环带旋转磁场实现对工件抛光的原理, 设计出了平面和球面光学元件自动抛光装置。分析了硬件控制和软件设计的具体结构, 并采用制作出的装置进行相应的工艺实验。实验结果表明, 该方法能够实现平面和球面光学元件的抛光需求。

关键词: 磁流变抛光; 面接触; 自动抛光装置; 光学元件

中图分类号: TP216 **文献标志码:** A

Design of Clitella Magnetorheological Finishing Device

Chen Zhili, Yang Shaopei, Yang Zhiqiang, Guo Zhongda, Liu Weiguo

(Shanxi Province Thin Film Technology & Optical Test Open Key Laboratory,
Xi'an Technological University, Xi'an 710032, China)

Abstract: Aiming at the problem of the “point contact” magnetorheological finishing (MRF) technology required the high precision of machine structure, need for pre-polished polishing and buffing low efficiency, put forwards a method by using a ring MRF technology to achieve planar and spherical optical components polishing. The method based on the “area-contact” polish ideas, designed the automatic polishing device using a closed loop with dc magnetic field to achieve the principle of rotation of the work piece polished. Analysis of the specific structure of hardware control and software designed, and use this device to process experiments. The experiments results show the method can achieve the polishing need of planar and spherical optical components.

Keywords: magnetorheological finishing; area-contact; automatic polishing device; optical components

0 引言

磁流变抛光技术是一种先进的可以实现超光滑加工的新兴光学制造技术, 具有广阔的应用空间^[1]。传统的磁流变抛光技术中采用的方法都是基于“点接触”的思想, 即通过控制磁流变液在工件表面形成的“小磨头”的运动轨迹和驻留时间来完成对工件表面的抛光和面形修正^[2]。该方法的缺点是对抛光机床机械结构的精度要求非常高。一般在抛光前, 还需对被抛光表面进行预抛光处理, 抛光效率较低。

为了提高磁流变抛光的效率, 研制出具有低成本、高性能的磁流变精密抛光装置, 西安工业大学光学加工工艺实验室提出了一种全新基于“面接触”抛光思想的磁流变抛光方法, 即利用磁流变液在磁场作用下形成一个环带状“抛光模”来完成对工件的抛光^[3]。与“点接触”法相比, 该技术具有更高的加工效率, 不需预抛光, 加工效率高, 可实现平面、球面、非球面的超光滑加工。

基于西安工业大学提出的环带式磁流变抛光原理^[4], 笔者给出了一套可行的磁流变抛光装置设计

和实现方案, 详细介绍该装置的控制过程和实施方案, 并进行实验验证。

1 环带面接触式磁流变抛光原理

环带面接触式磁流变抛光采用闭合直流环带旋转磁场, 如图 1 所示。此种结构在下磁极的边缘凸起部分能产生较强的磁场, 可以形成一个环带状的抛光带^[5]。当给电磁铁加电产生磁场后, 磁流变液会在下环形磁极周围形成一个具有抛光作用的环形凸起缎带, 利用该环形凸起缎带, 便可以实现对工件的抛光。运动装置提供了平移、旋转和摆动等运动方式, 使得工件表面与柔性精磨抛光磨具自适应吻合, 通过改变工件与磁极的相对位置和角度来实现对整个面的抛光, 磁流变液的提供采用中心循环送液方式^[6]。

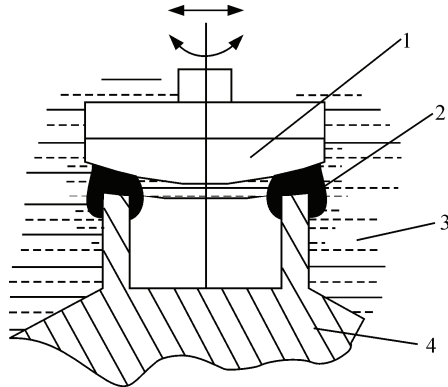
磁流变抛光机结合范成法和准球心法设计而成, 结合了 2 种方法的优点^[7]。既可以加工平面, 又可以加工曲面工件, 同时磨削均匀、加工工件的表面疵病等级高。其运动方式是: 工件轴在带动工件自身旋转运动的同时, 小幅度绕自身曲率中心弧

收稿日期: 2013-12-02; 修回日期: 2014-01-30

基金项目: 陕西省教育厅科研项目(09JS03); 高效高精磁流变产业化产品样机研制(2012KTCQ01-33)

作者简介: 陈智利(1973—), 男, 陕西人, 硕士, 副教授, 从事光学工艺与检测技术、光电仪器设计与开发研究。

形摆动^[8]；磨头可以形成环形的梯度磁场，同时绕自身轴线进行旋转运动。为了保证面型要求，必须保证工件旋转轴线、摆轴摆动轴线和抛光磨头旋转轴线在运动时相交于一点。



1. 工件；2. 凸起缎带；3. 磁流变液；4. 磁极。

图 1 磁极形成环形凸起缎带示意图

当需要加工球面光学零件加工时，如图 2 所示，调整摆轴旋转轴 1 与 Z 轴有一定的角度，设为 β ，调整旋转主轴 3 与 Z 轴保持一定的角度，设为 α ，当角度调整后，摆轴旋转轴 1 延长线与旋转主轴 3 延长线在 XOZ 平面内有一个交点，设为 O 点，然后调整磨头 4 沿 X 轴方向移动，使得磨头 4 旋转中心线延长线与 O 点相交。3 个轴的旋转中心在空间中的交点为球面光学零件的理论球心，D 为磨头的直径。

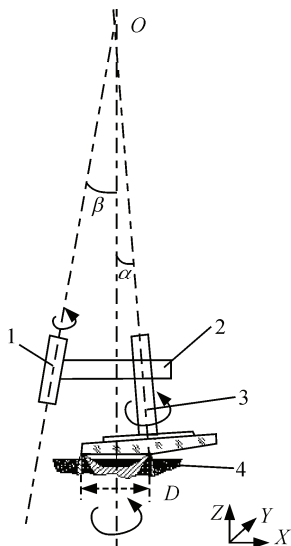


图 2 球面光学零件加工示意图

被加工光学零件的曲率半径 R 为：

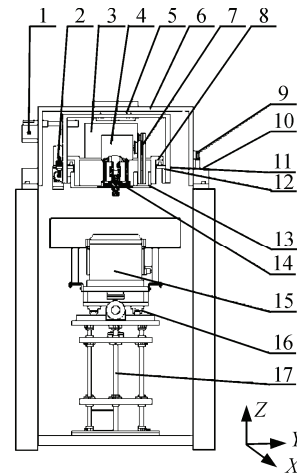
$$R = \frac{D}{2\sin\alpha} \quad (1)$$

2 磁流变抛光设备方案设计

磁流变抛光设备应完成以下功能：1) 具有自

动、手动 2 种工作方式，以满足不同的使用需要；2) 能满足平面、球面等多种不同类型工件的加工；3) 能实现多轴联动，转向与定位；4) 设备能加工 $\phi 300$ mm 光学元件，曲率半径 R 为 $-\infty \leq R \leq -30$ 或 $30 \leq R \leq \infty$ ，加工后表面粗糙度小于 1 nm。

磁流变抛光设备主要由摆动调整机构、水平调整机构、工件运动机构、主轴移动机构、 β 角调整机构、 α 角调整机构、磨头运动机构(磨头转动、磨头水平移动、磨头升降)等部分构成，如图 3。



1. 摆动调整装置；2. 水平调整装置；3. 工件运动电机；4. 减速器；5. 摆轴旋转轴；6. 支架；7. 带传动装置；8. 主轴移动装置；9. 摆动角度调节装置；10. β 角调节装置；11. 机架；12. α 角调节装置；13. 支撑架；14. 旋转主轴；15. 抛光磨头；16. 磨头水平移动台；17. 磨头升降台。

图 3 磁流变精密抛光机总体结构

1) 摆动调整机构：由角度调节轴和摆轴组成，在加工工件时进行摆轴的角度调整和工件的摆动。要求抛光平面光学元件时，摆轴与水平摆臂的夹角为 90° ，抛光球面光学零件时，摆轴与水平摆臂成一定的夹角但不等于 90° ，而且要能够实现摆轴中心线、工件轴中心线及摆轴角度旋转中心线三者能够相交于一点。

2) 工件运动机构：由工件旋转轴和工件角度调节轴组成，结构设计要满工件可以绕自身旋转，当抛光不同曲率半径的光学元件时，光学元件的旋转轴线与垂直方向的夹角可以进行调整，光学元件可以在水平摆臂上进行直线方向位置的调整。

3) 主轴运动机构：由主轴和主轴电机构成，具体功能为调整工件的前后位置，方便工件的上、下盘，并在初始化时准确找到主轴原点位置。

4) β 角调整机构：由 β 轴和 β 轴电机构成，具体功能为带动工件绕着 β 轴进行摆动。

5) α 角调整机构：由 α 轴和 α 轴电机构成，具体功能为带动工件绕着 α 轴进行摆动。

6) 磨头运动机构: 由磨头转动、磨头水平、磨头升降 3 部分构成, 磨头实现对元件的面接触式抛光, 磨头转动实现加工时磨头的转动, 磨头水平和磨头升降可根据加工元件的厚度、面形不同而进行参数调整, 以满足不同的加工需求。

3 控制系统设计

通过磁流变抛光机结构以及运动分析可得: 整个控制系统可分为上位机(触摸屏), 下位机(PLC), 执行机构(位置控制系统、运动控制系统、磁场电压控制系统、磁流变液循环控制系统、磁流变分离系统、错误报警系统和测量反馈系统), 图 5 为整个控制系统结构框架图。

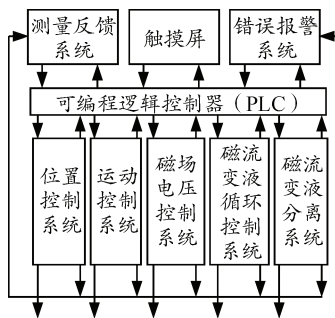


图 5 控制系统结构框架

3.1 机构调整实现

机构调整包括角度的调整以及直线运动, 角 α 和角 β 的运动方式不同则控制方案也不同下面就角度和直线运动的方法具体如下:

3.1.1 角 α 运动实现

根据设备原理分析, 角 α 主要实现机构调整, 其控制精度为 $2'$, 负载扭矩为 $1.0 \text{ N}\cdot\text{m}$ 。考虑到设备为高精抛光设备, 精度和稳定性要求比较高, 所以本系统选用交流伺服系统实现角度控制, 其方法是: NC 模块控制伺服驱动器, 再由伺服驱动器控制电机, 伺服电机的脉冲反馈信号和伺服驱动器相连, 实现闭环控制。根据精度要求, 设置合理电子齿轮比以及选择合理的减速器。

设角 α 移动 $1'$ 时所需的脉冲数为 P_1 , 电子齿轮比为 M_1 , 减速比为 N_1 , 电机旋转一周需要 10 000 个脉冲, 本系统精度要求是 $2'$, 通过测量当 M_1 为 5, N_1 为 8 时远远可以满足精度要求 $2'$ 。

3.1.2 角 β 运动实现

β 轴和丝杠之间由一个连杆相连接, 轴和电机之间的运动为非线性关系, 不容易实现高精度的控制, 笔者采用的方法是在 β 轴上添加一个编码器,

将编码器反馈的脉冲通过高速计数器计数, 得出 β 轴旋转的角度。根据结构以及工艺要求可得 β 角度控制精度为 $5'$, 负载扭矩为 $1.2 \text{ N}\cdot\text{m}$ 。选择分辨率为 10 000 线的欧姆龙编码器(型号 E6G3-CWZ1X-H)实现位置信号反馈, 通过测量 β 角度的控制精度为 $3'$ 。

3.2 直线运动实现方法

本系统的机构调整由伺服加光栅尺来实现, 由精度较高的滚珠丝杠实现机械传动, 然后利用光栅尺(信和 KA-300 光栅尺)反馈位置信息给 PLC 的高数计数模块, PLC 根据反馈信号, 利用 NC 模块控制伺服驱动单元来实现全闭环运动, 从而实现高精度控制。图 6 为伺服系统结构图。

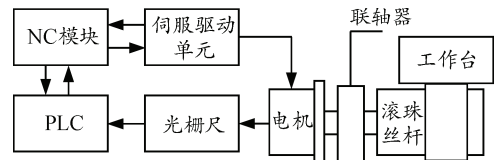


图 6 伺服系统结构

4 软件设计

磁流变抛光设备具体工作流程如图 7 所示。

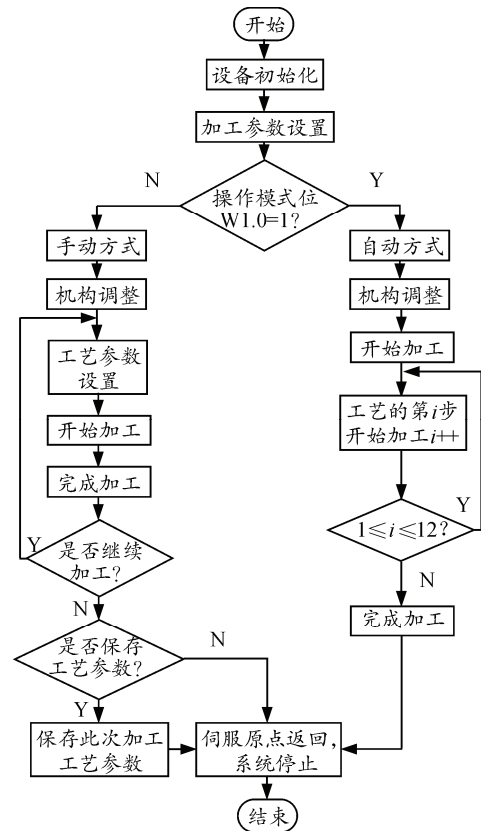


图 7 磁流变抛光设备工作流程

1) 设备初始化: 由用户按下电源启动按钮, 设

备自动进行初始化。初始化过程为磨头升降、磨头水平、 β 轴、水平轴、摆动轴、主轴、 α 轴先后进行原点搜索，并根据搜索回到各轴的原点的过程，是工艺加工必不可少的准备过程。

2) 参数输入：根据加工零件的不同，要求在加工前输入待加工件相关的参数(工件类型、口径、曲率半径、厚度等)，参数输入过程在 Proface 触摸屏上进行。

3) 机构调整：根据加工零件的类型、口径大小和曲率半径以及厚度的不同，要求抛光机的结构能够有不同的调整方案。机构调整包括磨头高度、磨头的水平距离、主轴位置、主轴角度、水平角度、摆轴角度等的调整。

4) 运动控制：由于材料的不同以及加工效率等因素的不同，对磁流变抛光机的运动情况要求也是不同的。运动控制包括主轴速度、摆轴速度、磨头速度、磁场电压、磁流变液的流速、冷却泵。由于材料的去除速度服从 Preston 方程，不同的加工对象不同的精度要求 3 个轴的相对速度和磁场电压，磁流变液的流速是不同的^[9]。所以通过 Preston 方程和磁场电压，磁流变液的流速等综合因素的分析来研究运动算法从而设计出合理的运动控制系统。

5) 设备的软件设计还应该具备一定的智能化，能实现判别功能。例如在自动加工过程中，设备可自动判断工艺加工处于哪个步骤(自动加工工艺共有 12 个步骤)，是否已经全部完成，如已全部完成，则结束加工，否则转到下一个工序继续加工；在手动加工过程中，输入工艺参数后，系统会提醒是否保存工艺参数，以方便下一次对同类型工件的加工。

5 磁流变抛光实验

5.1 粗糙度和去除率验证实验

设备的要求是抛光后元件表面粗糙度小于 1 nm，通过改变加工间隙、工件轴和磨头的相对运行速度，对直径为 100 mm 的 K9 玻璃抛光来测试加工精度能否达到设计要求，实验结果如表 1 所示。

表 1 粗糙度和去除率验证实验

样本 i	加工间隙 d/mm	加工时间 t/min	表面粗糙度 Ra/nm
1	1.5	40	0.8
2	1.0	40	0.7

5.2 面形验证实验

面形的检测通过单因素实验来检测能否达到要求，工艺试验选用直径为 100 mm 的 K9 玻璃。在铣磨机上加工直到面形为 1.5 μm 时，再用磁流变抛光进行抛光，加工间隙设置为 1 mm，工件和磨头以及摆轴的速度分别设置为 200 r/min、300 r/min、150 r/min；磁流变液用西安工业大学自行研制的水基磁流变液，抛光时每隔 10min 对其进行检测一次并且记录数据，30min 时面形精度达到 1 μm 。

6 结论

实验结果表明：该磁流变抛光机设备与传统的抛光设备相比较，可加工工件的口径大、加工灵活、加工效率高、无需传统抛光模的制作、可以实现平面和球面光学零件的“面接触”式的高效率抛光，很好地实现了对磁流变抛光过程的控制。该设备的成功研发，为光学元件的磁流变抛光，找到了一种全新的方法，可以大范围地使用到航空、航天、核工业、激光武器等军用以及民用光学元件的抛光加工中，具有很大的市场前景。

参考文献：

- [1] Jacobs S D, Prokhorov I V, Kordonsky W I, et al. Magnetorheological finishing: a deterministic process for optics manufacturing[J]. The International Society for Optical Engineering, 1995, 25(6): 372-382.
- [2] Kordonski William I. Adaptive Structures Based on Magnetorheologica Fluids, Proc 3rd IntConf, Adaptive Struct [C]. San Diego, 1992.
- [3] 刘卫国, 郭忠达, 杭凌侠, 等. 磁流变柔性精磨抛光设备和方法: 中国, 200610043079.1[P]. 2006-06-30.
- [4] 阳志强, 郭忠达, 陈智利, 等. 一种磁流变抛光方法的探讨[J]. 应用光学, 2009, 30(3): 500-504.
- [5] 郭忠达, 杜书娟, 刘卫国, 等. 环带磁场在磁流变抛光技术中的应用[J]. 西安工业大学学报, 2007, 30(3): 212-219.
- [6] 冯之敬, 王飞, 张云. 电磁方式磁流变抛光头: 中国, CN1216723C[P]. 2005-08-31.
- [7] 康桂文, 张飞虎, 仇中军, 等. 精密磁流变抛光机床的研制[J]. 设计与研究, 2005(7): 47-49.
- [8] 王二建, 桑志勇, 吴云. USB伺服驱动速度环设计及仿真[J]. 兵工自动化, 2013, 32(8): 75-77.
- [9] 宋春荣, 冯蒙丽, 蔡玉平, 等. 步兵轻武器新型夜瞄复合荧光材料的光学特性[J]. 四川兵工学报, 2013, 34(4): 127-129.