

文章编号 1004-924X(2021)02-0286-11

## 机械轴与虚拟轴复合的磁流变抛光

张 韬, 何建国, 黄 文, 樊 炜\*, 张云飞

(中国工程物理研究院 机械制造工艺研究所, 四川 绵阳 621900)

**摘要:**传统的磁流变抛光工艺采用抛光缎带的固定位置对工件进行法向加工,由于机床转轴的行程限制,工件陡度较高区域不可达,当前基于等效磁场原理的变切触点抛光方法存在着等效磁场实现成本高,没有充分发挥机械轴与虚拟轴相结合的抛光能力等问题。本文针对这些问题提出了一种用于加工高陡度曲面元件的方法,分析了保证去除函数稳定的磁场特点,通过磁场测量实验验证了磁场的稳定范围,通过采斑实验确定了去除函数稳定的虚拟轴范围为 $\pm 12^\circ$ ,提出了将虚拟轴与机械轴复合使用的加工方法,并基于刚体变换实现了该加工方法下的坐标解算。最后,通过增加倾角的球面件抛光实验,将球面元件 95% 口径的 PV 值收敛为 0.096 $\lambda$ , RMS 值收敛为 0.012 $\lambda$ ,实验结果表明虚拟轴和机械轴复合抛光方法具有针对高陡度曲面的修形能力。

**关键词:**磁流变抛光;变切触点;机械轴;虚拟轴;高陡度曲面

中图分类号:TH706 文献标识码:A doi:10.37188/OPE.20212902.0286

## Magnetorheological finishing method that combines mechanical and virtual axes

ZHANG Tao, HE Jian-guo, HUANG Wen, FAN Wei\*, ZHANG Yun-fei

(Institute of Mechanical Manufacturing Technology, China Academy of Engineering Physics,  
Mianyang 621900, China)

\* Corresponding author, E-mail: weifan1127@hust.edu.cn

**Abstract:** The conventional magnetorheological finishing employs a fixed position of the polishing ribbon to perform normal processing on the workpiece. However, the processing area of the workpiece is greatly restricted by the limited stroke of the machine tool rotary axis. Recently, shortcomings of the current polishing method have been identified based on the principle of equivalent magnetic fields, which implies a high cost for realizing an equivalent magnetic field and insufficient polishing ability due to the fact that the mechanical and virtual axes are not combined. A method for processing a high-gradient curved surface was thus proposed in this study. The characteristics of the magnetic field that ensure the stability of the removal function were then analyzed, and the magnetic field stability range was verified through a magnetic field measurement experiment. The study also conducted a spot-taking experiment, which determined that the feasible range of the virtual axis for the removal function stability was  $\pm 12^\circ$ . A machining method that combines the virtual and mechanical axes was then proposed, and a coordinate calculation for the machin-

收稿日期:2020-10-28;修订日期:2020-11-20.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 61605182);中国工程物理研究院创新发展基金资助项目(No. K1267-2022-TCF);科学挑战计划资助项目(No. TZ2016006-0502-03)

ing method was realized based on rigid body transformation. Finally, the study conducted a spherical polishing experiment with an greater inclination angle. Results shows that the peak-valley(PV) value of the spherical workpiece with a 95% aperture size converges to  $0.096\lambda$ , and the root mean square(RMS) value converges to  $0.012\lambda$ , indicating that the proposed composite polishing method of virtual and mechanical axes can obtain a high-gradient surface.

**Key words:** magnetorheological finishing; variable normal-contact; virtual axis; mechanical axis; high-gradient surface

## 1 引 言

随着现代科学技术的不断发展,复杂曲面光学元件在科学实验和国防领域中的应用越来越广泛。面向科学实验和国防科技的光学产品和装置对复杂曲面光学元件的需求与日俱增<sup>[1]</sup>,大量高精度曲面镜被用来校正像差、改善像质、扩大视场、简化结构与减轻质量,以促进光学系统的性能提升。磁流变抛光技术可以实现光学元件的快速高精度低成本制造,因而在光学加工中应用广泛。为实现材料的确定性去除,需要实时保证抛光轮适应工件的面形,保持法向接触以保证去除函数的一致<sup>[2]</sup>。在加工曲面面形时,常规的方法是通过机床的机械轴联动控制工件的姿态和位置实现工具上的定点与工件法向接触。对于非球面和自由曲面抛光,机床需要更多的转动轴来保证加工自由度,而多自由度的机床造价昂贵、占用空间较大、结构复杂,实现高精度联动控制难度较大;其次,加工能力受限于机床转动轴的行程,当元件陡度较大时会出现超行程的问题;此外,机械轴本身的质量和惯量很大,在加工高陡度曲面元件时会接近其极限行程,运动产生的机构振动和定位误差大,导致面形精度恶化,影响加工质量<sup>[3]</sup>。由此可见,低自由度下曲面元件的加工和联动机械轴加工行程的扩大,对于提高磁流变抛光工艺的适用性有着重要的意义。

机床自由度是由机械轴数量决定的,因此在低自由度下加工曲面件本质上是降低对机械轴数量的要求。针对这个问题,周洁<sup>[4-5]</sup>在利用七轴四联动砂轮工具磨削自由曲面时设计了一种母线圆弧面结构的砂轮,整个外缘圆角作为工作表面,找到能和自由曲面法向量一致的磨削点来拟合,使得四轴联动机床上加工扭转叶片成为可能。在磁流变抛光工艺中,美国QED公司的Ma-

loney等<sup>[6]</sup>提出了“虚拟轴”代替机床联动轴,以解决磁流变机床自由度不足的问题。磁流变抛光的工具是抛光轮,与文献[4]砂轮外缘一样有圆弧部分。该方法同样利用了圆弧的几何对称性,抛光时工件与抛光轮上缎带的法向接触点根据面形法矢在一定范围内变动,因此不需要添加物理轴,同时QED公司抛光轮上的触点可变范围达 $\pm 45^\circ$ 。国防科技大学的宋辞<sup>[8]</sup>等人根据抛光轮和磁铁的结构尺寸以及工艺参数理论计算了可加工工件的最大斜率,并进行了磁场稳定性仿真和测量。该方法以去除函数的体去除率和形态作为衡量指标,确定了 $\pm 7^\circ$ 的最大可加工工件倾角。虽然去除函数特性非常稳定,但是工件可加工倾角范围太小,导致虚拟轴的范围受限。中科院长春光机所的李龙响<sup>[9]</sup>提出虚拟轴可用的前提是抛光液循环系统和永磁场的分布稳定,并进行了稳定永磁场的设计,结合去除函数完整性和实际加工需求给出了 $\pm 15^\circ$ 的工件倾角范围,以体去除率证明去除函数的稳定性,并给出了虚拟轴下位姿控制坐标的变换关系。

综合目前的研究来看,低自由度下加工陡度较低曲面的问题已通过虚拟轴解决,但针对高陡度曲面元件的加工,虚拟轴却难以满足要求,此时依然需要单独调用机械轴联动参与加工过程。目前,没有学者提出将虚拟轴和机械轴复合使用的方法用于磁流变抛光,因此虚拟轴的适用性还有进一步扩展的潜力。本文针对高陡度曲面元件加工时机床联动轴行程不足的问题,结合磁流变抛光中的虚拟轴原理,提出了将虚拟轴和联动轴结合以间接扩展机械轴行程的方法,并以此为基础进行了该方法的坐标解算。实验表明,本文所提出的磁流变加工方法在提高机床联动轴加工行程的同时保证了面形收敛,机床的加工能力得到了明显的提升。

## 2 磁流变抛光及虚拟轴原理

磁流变抛光的基本原理是磁流变液(由磁性颗粒、抛光粉、基液和稳定剂组成)通过具有传送和回收功能的循环系统流动,从而实现对工作表面的加工。其中,抛光液通过输液泵由喷嘴喷洒在旋转的抛光轮上,在高梯度磁场的作用下凝聚变硬,成为具有黏塑性的 Bingham 介质缎带,在工件与缎带接触区以剪切的形式实现对材料的去除,如图 1 所示。

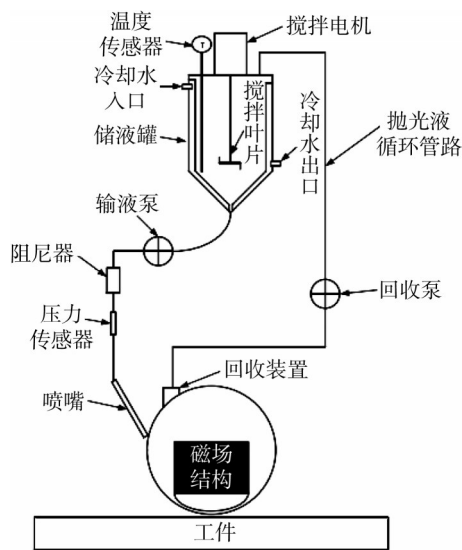


图 1 磁流变抛光循环系统

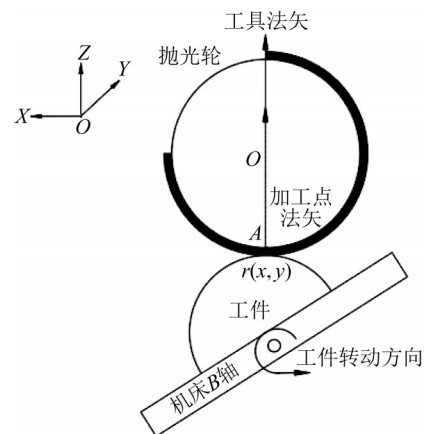
Fig. 1 Magnetorheological finishing circulation system

当前的磁流变抛光技术与数控加工技术相结合,形成了数控磁流变抛光技术,这是一种基于计算机控制表面成形技术的确定性抛光工艺<sup>[10]</sup>。数控磁流变抛光的基本原理是根据干涉仪等测量仪器获得工件的面形数据,确定材料去除量,根据去除函数特性生成抛光头的运动轨迹和驻留时间,利用计算机控制远小于工件口径的抛光磨头(磁流变抛光中为抛光轮下的缎带)沿着规划的路径和驻留时间在工件表面运动,保持磨头与工件间的相对线速度和正压力一定,去除函数保持确定的特性,经过多次的迭代实现面形误差的定量去除。加工过程就是抛光工具的去除函数与单位面积的驻留时间在工件表面的卷积,可表示为:

$$H(x, y) = R(x, y) * T(x, y), \quad (1)$$

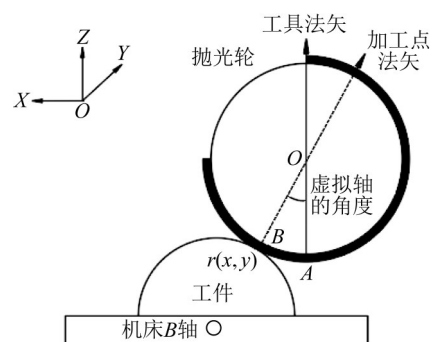
其中: $H(x, y)$ 是驻留点位置 $(x, y)$ 处的材料去除量, $R(x, y)$ 是去除函数在 $(x, y)$ 处单位时间的材料去除量, $T(x, y)$ 是 $(x, y)$ 处单位面积的驻留时间。可见,确定性修形的关键因素在于去除函数的稳定。

为保证多轴联动抛光时去除函数稳定,一般通过转动工件使加工点 $r(x, y)$ 的法向矢量通过抛光轮缎带最低点 $A$ 对应的工具矢量来实现<sup>[8]</sup>,如图 2(a)所示。在一些低陡度光学元件的加工时,若保证抛光轮缎带最低点附近的法向接触点(如图 2(b)中的 $B$ 点)对应的去除函数与最低点处一致,则可以用这些点取代最低点进行法向接



(a) 使用抛光缎带的固定位置与加工点切触

(a) Rotating the workpiece to make the processing point and the polishing wheel touch



(b) 用不同的切触点和加工点切触

(b) Processing with different contact points and processing points

图 2 磁流变抛光的一般加工方法和虚拟轴对比

Fig. 2 Comparison of general machining method and virtual axis of magnetorheological finishing

触加工,从而取代某些联动轴<sup>[9]</sup>,这些点被称为切触点。切触点的使用使得抛光工具好像在围绕自身中心 $O$ 旋转,形成了虚拟轴。此时,只需要知道抛光轮半径、缎带厚度以及浸入深度等信息,便可以根据驻留点的法向量计算对应切触点的位置,以进行加工。然而,当前“虚拟轴”主要用于取代机械轴,对于虚拟轴和机械轴的复合使用以进一步增强机床的行程,则尚未开展研究。

### 3 机械轴与虚拟轴复合抛光工艺

#### 3.1 虚拟轴关键技术

磁流变抛光的高确定性是由去除函数的稳定性作为基础的,因此使用虚拟轴的关键是确定去除函数的稳定范围。由于磁流变液凝聚所需的高梯度磁场由抛光轮内部的电磁铁产生,因此虚拟轴范围内去除函数特性主要取决于磁场特性。

抛光轮剖面如图 3 所示,抛光轮 $A$ 点所在一侧为抛光液流入区, $C$ 侧为流出区,黑色条纹为缎带区,阴影部为磁铁的磁臂。由于磁臂下方圆弧区 $X$ 方向的尺寸远大于 $Y$ 方向的尺寸,可认为除磁铁边缘位置外, $YOZ$ 截面下方磁臂气隙的磁场分布相同<sup>[11]</sup>。设抛光轮上虚拟轴的范围为圆弧线 $AC$ , $A$ 和 $C$ 与抛光轮中心连线与竖直线夹角分别记为圆心角 $\theta_{\max}$ 和 $\theta_{\min}$ ,其中 $\theta_{\min} < 0 < \theta_{\max}$ ,则虚拟轴转角即抛光轮中心到抛光缎带切触点连线与竖直线夹角,记为 $\theta$ ,其中 $\theta \in [\theta_{\min}, \theta_{\max}]$ 。抛光轮表面 $1.3 \text{ mm}$ 以内为缎带所在层面,该层面在 $AC$ 弧线区的磁场分布决定了虚拟轴下去除函数的稳定性。在循环系统稳定和忽略磁场分布的边缘效应的条件下,理论上

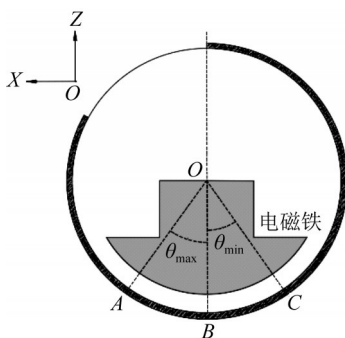


图 3 磁流变抛光轮结构

Fig. 3 Structure of MRF polishing wheel

该处的磁场分布应是一致的才可以保证去除函数的一致性<sup>[9]</sup>。通过测量磁通密度沿缎带的稳定性以及各测量点与最低点的磁通密度差异大致确定去除函数的采集范围,以5%的去除率差异作为衡量去除函数的稳定性指标,得到 $\theta_{\max}$ 和 $\theta_{\min}$ 的值<sup>[7-8]</sup>。

#### 3.2 机械轴与虚拟轴复合抛光的切触策略

依靠虚拟轴能够满足低陡度曲面的加工需求,但对于高陡度曲面元件而言,虚拟轴的范围远远不够,此时需要调用机械轴联动。然而,机床的机械轴行程能力是有限的,而且在大行程状态下旋转轴会由于转矩过大而产生较大的误差和振动。针对这种元件,可以采用机械轴和虚拟轴复合调用的策略,具体如下:当切触点在工件上的法矢在虚拟轴范围时,采用虚拟轴实现变切触法向加工;当切触点在工件上的法矢超过虚拟轴范围时,切触位置达到虚拟轴边界处,同时调用机械轴实现法向加工。

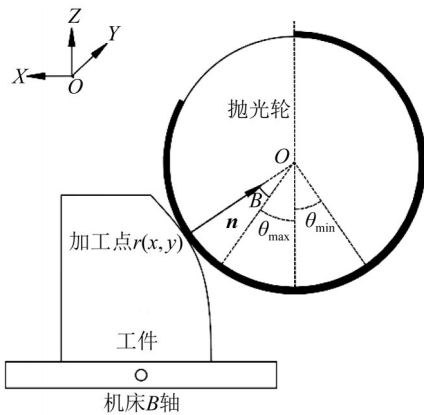
根据机床运动结构建立工件-抛光轮坐标系(本文采用左手系),如图 4 所示。首先以加工点 $r(x, y)$ 处的法矢 $n(x, y) = (i, j, k)$ 计算使用缎带最低点加工时与虚拟轴复合使用的机械轴转角 $\beta = \arcsin(i/\sqrt{1-j^2})$ 。若 $\beta \in [-\theta_{\max}, -\theta_{\min}]$ 则不调用机械轴,以虚拟轴进行变触点加工,此时虚拟轴角度 $\theta = -\beta$ ;若加工点超出虚拟轴范围,如图 4(a)所示,则调用机械轴,其转角 $B$ 以式(2)计算,使得加工点到达虚拟轴的 $\theta_{\min}$ 或 $\theta_{\max}$ 位置,如图 4(b)所示,并以该位置的触点进行加工,此时 $\theta = \theta_{\min}$ 或 $\theta_{\max}$ 。

$$B = \begin{cases} 0, & -\theta_{\max} \leq \beta \leq -\theta_{\min} \\ \theta_{\max} + \beta, & \beta < -\theta_{\max} \\ \theta_{\min} + \beta, & \beta > -\theta_{\min} \end{cases} \quad (2)$$

机械轴和虚拟轴结合的方法能减少转动轴的负担,降低多轴联动产生的机构振动和定位误差,同时拓展了加工区域,能提升对高陡度曲面元件的抛光能力。

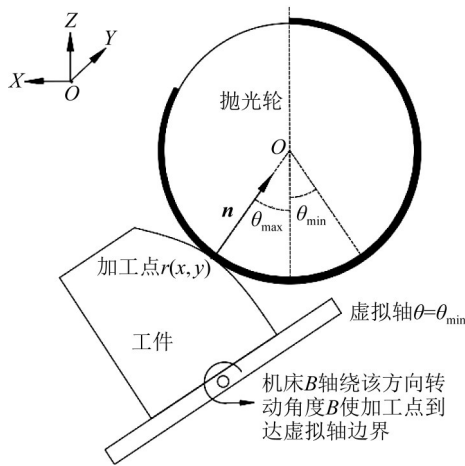
#### 3.3 机械轴与虚拟轴复合抛光工艺的轨迹坐标解算

本文提出的机械轴与虚拟轴复合使用的抛光工艺,其坐标解算需要根据机床结构建立对应的刚体变换模型。实验平台是自研的 PKC-1000Q2 机床,基本结构如图 5 所示。该机床具有



(a)加工点超出变触点可加工范围

(a) The processing point exceeds the range that can be processed by the variable contact point



(b)针对(a)的情形,机械轴旋转角度 $B$ 后加工点到达可加工位置

(b) For the case (a), the processing point reaches the machinable position after the mechanical axis rotates at angle  $B$

图 4 虚拟轴与机械轴的复合调用

Fig. 4 Polishing with combination of virtual axis and mechanical axis

3平动3转动共6个自由度,其中抛光轮工具是具有1转动2平动的并联机构,其平动方向为主轴的Y方向和Z方向,摆动轴为A轴,垂直于Y轴和Z轴。下方工作台为1平动2转动的并联机构,平动方向为X方向,转动轴C轴安装在B轴上。抛光轮采用悬臂梁结构固定于Z轴上。抛光轮直径为300 mm,表面磁场由内部采用的电磁铁产生。为实现工件定位,在抛光轮一侧装有Renishaw测头。该加工系统具备 $\phi 1\ 000\text{ mm}$ 以

内口径非球面加工能力,其线性轴的定位误差在 $10\ \mu\text{m}$ 以下,转动轴的定位误差在 $8''$ 以下,A轴行程为 $\pm 30^\circ$ ,B轴行程为 $-90^\circ\sim 30^\circ$ 。



图 5 PKC-1000Q2 数控机床

Fig. 5 PKC-1000Q2 CNC machine tool

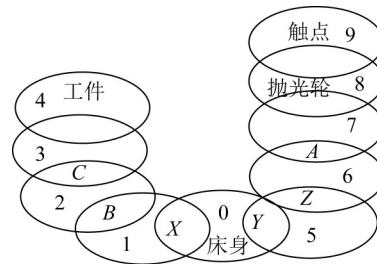


图 6 机床结构的拓扑模型

Fig. 6 Topological model of machine tool structure

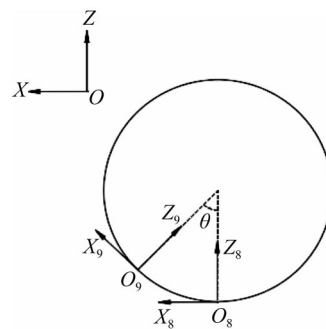


图 7 抛光轮切触点与编程点刚体变换关系

Fig. 7 Rigid body transformation relationship between polishing wheel contact point and programming point

接下来对上述工艺进行轨迹点坐标解算。根据图 5 中机床各轴运动机构的连接关系,建立磁流变机床机械结构的拓扑模型,如图 6 所示。其中 1~3 表示工件一边的运动结构,1 表示 X 轴

的运动机构,2表示B轴的运动机构,3表示C轴的运动机构,5~7表示和抛光轮有关的运动结构,5表示Y轴的运动机构,6表示Z轴的运动机构,7表示A轴的运动机构,0表示床身,4表示工件,8表示抛光轮,9表示与工件接触的抛光轮触点。

由拓扑模型可得到各结构之间的齐次坐标变换关系<sup>[12]</sup>。以缎带最低点作为机床编程点,如图7所示,分别在抛光轮编程点处和实际触点处建立坐标系 $O_8$ 和 $O_9$ ,则从 $O_8$ 到 $O_9$ 坐标系的刚体变换可表示为:

$${}^8_9T = {}^8_9T_P \cdot {}^8_9T_S, \quad (3)$$

其中: ${}^8_9T_P = Trans(O_8, O_9)$ ,表示 $O_8$ 坐标系到 $O_9$ 坐标系的平移变换矩阵; ${}^8_9T_S = Rot(y, \theta)$ ,表示 $O_8$ 坐标系原点平移到 $O_9$ 坐标系的原点后相对于 $X_9, Y_9, Z_9$ 的旋转变换矩阵。以此类推:

${}^7_8T$ :表示A轴机械结构运动的坐标系 $O_7$ 到

$$T = {}^3_4T^{-1} \cdot {}^2_3T^{-1} \cdot {}^1_2T^{-1} \cdot {}^0_1T^{-1} \cdot {}^5_5T \cdot {}^6_6T \cdot {}^7_7T \cdot {}^8_8T \cdot {}^9_9T. \quad (4)$$

矩阵 $T$ 的含义为坐标系 $O_9$ 在坐标系 $O_4$ 中的表达。将触点坐标系下的切触点坐标 $v = [0, 0, 0, 1]^T$ ,以及切触点法向矢量 $w = [0, 0, 1, 0]^T$ 右乘矩阵 $T$ ,得到与工件的切触点在工件坐标系下的位置 $q_w = [x, y, z, 1]^T$ 与法矢姿态的表示式 $v_w = [i, j, k, 0]^T$ ,则有:

$$[q_w, v_w] = T \cdot [v, w]. \quad (5)$$

解算式(5)形成的方程组即可得到抛光轮缎带最低点在机床坐标系下的轨迹坐标。

采用光栅线轨迹加工,根据待加工工件的曲面方程,规划缎带切触点的坐标。已知抛光轮切触点在工件坐标系下的位置 $[q_x, q_y, q_z]$ 和对应的加工点法矢量 $[i, j, k]$ ,由于 $\beta = \arcsin(i/\sqrt{1-j^2})$ ,按式(2)计算切触点对应的 $\theta$ 和B轴转角。抛光轮编程点在床身坐标系下的坐标用式(6)计算。其中, $[X, Y, Z, A, B]$ 为抛光轮编程点在床身坐标系下的坐标, $\theta$ 为虚拟轴对应的圆心角, $[x_w, y_w, z_w]$ 是工件坐标系原点相对C轴坐标系的位置, $R_r$ 为缎带最低点距离抛光轮几何中心的距离, $[y, z]$ 为缎带最低点相对A轴轴线的位置, $x_0$ 为B轴和C轴机械结构在X方

缎带最低点处坐标系 $O_8$ 的刚体变换矩阵;

${}^6_7T$ :表示Z轴机械结构运动的坐标系 $O_6$ 到A轴转动坐标系 $O_7$ 的刚体变换矩阵;

${}^5_6T$ :表示Y轴机械结构运动的坐标系 $O_5$ 到Z轴坐标系 $O_6$ 的刚体变换矩阵;

${}^0_5T$ :床身坐标系到表示Y轴机械结构运动的坐标系 $O_5$ 的刚体变换矩阵;

${}^0_1T$ :床身坐标系到表示X轴结构运动的坐标系 $O_1$ 的刚体变换矩阵;

${}^1_2T$ :X轴运动坐标系到表示B轴机械结构转动的坐标系 $O_2$ 的刚体变换矩阵;

${}^2_3T$ :B轴转动坐标系到表示C轴机械结构转动的坐标系 $O_3$ 的刚体变换矩阵;

${}^3_4T$ :C轴转动坐标系 $O_3$ 到工件坐标系 $O_4$ 的刚体变换矩阵。

由以上坐标系的刚体变换关系可以得到从工件坐标系 $O_4$ 到触点坐标系 $O_9$ 的变换矩阵 $T$ :

$$T = [x, y, z, 1]^T$$

向的距离。

综上所述,基于机械轴与虚拟轴复合的磁流变抛光方法的工艺流程如图8所示。

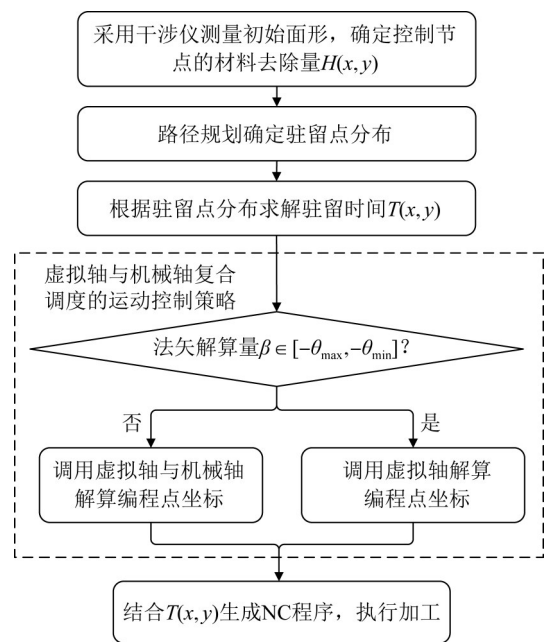


图 8 机械轴与虚拟轴复合的磁流变抛光工艺流程  
Fig. 8 Process flow chart of magnetorheological finishing with combination of mechanical axis and virtual axis

$$\begin{cases} X = x_w(1 - \cos B) - q_x \cos B + (q_z + z_w) \sin B + R_r \sin \theta + (1 - \cos B) x_0 \\ Y = -z_r \sin A + y_l(1 - \cos A) + q_y - R_r \sin A (1 - \cos \theta) \\ Z = x_w \sin B + q_x \sin B + (z_w + q_z) \cos B - z_w + y_l \sin A + z_r(1 - \cos A) + R_r \cos A (\cos \theta - 1) + x_0 \sin B \\ A = \arcsin(j) \end{cases} \quad (6)$$

## 4 实验结果与分析

### 4.1 磁通密度分布测量

缎带区的磁场分布决定了去除函数特性,是决定虚拟轴范围的关键因素,因此应优先对磁场稳定性进行验证。经计算,磁臂弧线区的长度换算成角度为 $90^\circ$ ,考虑磁铁边缘效应,对 $[-30^\circ, 30^\circ]$ 的磁通密度进行测量。使用PAX-450型数字特斯拉计,将其测头摆放在抛光轮缎带下方 $1.3 \text{ mm}$ 处使磁感应线基本垂直穿过内部霍尔元件。调整测头姿态使特斯拉计达到测量最大值,以同一姿态和距离分别测量各角度对应的磁通密度,得到抛光轮缎带处的磁感应强度和它关于角度的分布。以抛光轮中心为坐标原点建立柱坐标系,得到各触点处的磁通密度随虚拟轴圆心角的分布,如图9所示。观察磁感应强度的分布情况可知,总体磁通密度偏弱,处于缎带收敛的边界值<sup>[9]</sup>,并且从抛光液流入区到流出区的磁通密度略微增加。出现这一现象的原因在于磁铁和抛光轮的配合在 $X$ 方向出现了偏移,所以两边的磁通密度也不完全一致。从去除函数受磁场的影响程度来判断,去除函数的稳定范围并不能达到磁通密度的测量范围。

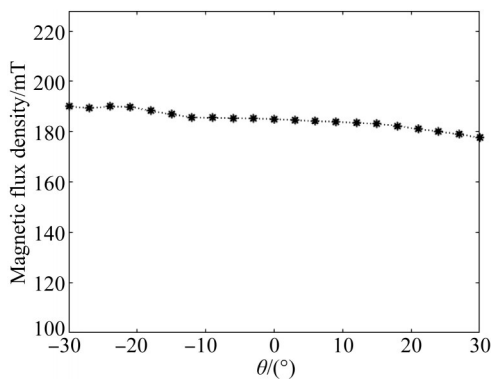
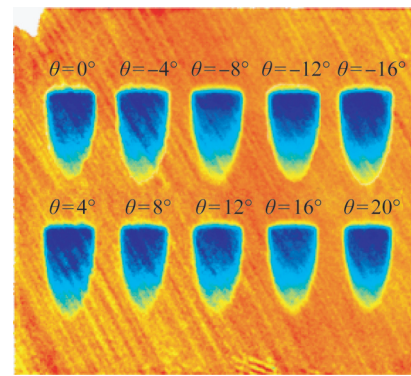


图9 抛光轮表面缎带处的磁感应强度分布

Fig. 9 Magnetic induction intensity distribution at ribbon on surface of polishing wheel

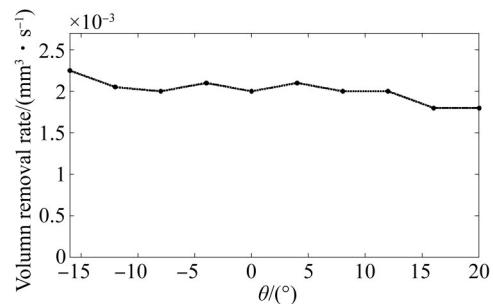
### 4.2 不同切触位置的去除函数获取与验证

在验证去除函数稳定性时,还需要对不同切触点下的去除函数进行测试。为满足一般非球面的虚拟轴加工需求<sup>[9]</sup>,同时考虑 $\theta < -16^\circ$ 和 $\theta > 20^\circ$ 后磁通密度相对 $0^\circ$ 时的值变化较大,因此选择采斑件与水平面的夹角为 $-16^\circ \sim 20^\circ$ ,采斑步距为 $4^\circ$ 。实验的基本工艺参数如下:抛光轮直径为 $300 \text{ mm}$ ,缎带线速度为 $1.5 \text{ m/s}$ ,抛光粉类型为氧化铈,磁流变液温度为 $20^\circ \text{ C}$ ,室温在 $21^\circ \text{ C}$ ,缎带的浸入深度为 $0.3 \text{ mm}$ ,浸入时间为 $3 \text{ s}$ 。去除函数形态与体去除率结果如图10所示。材料去除量主要与体去除率相关,因此主要关注体去除率的变化<sup>[9]</sup>。从抛光斑的形态分布以及体去除率信息可以看出,各角度去除函数与 $0^\circ$



(a) 形态分布

(a) Morphological distribution



(b) 体去除率分布

(b) Distribution of volume removal rate

图10 去除函数采集结果

Fig. 10 Removal function collection results

下的去除函数相比,斑长和斑宽存在很小的差异,体去除率基本在  $2.0 \times 10^{-3} \text{ mm}^3/\text{s}$  附近分布,磁通密度随角度的增加而略衰减的问题对去除函数在最低点附近较小范围内的影响是不明显的。此外,实验误差造成了去除率分布的波动。经计算去除函数在  $\pm 12^\circ$  内的体去除率差异性在 5% 以内,根据文献[6]和文献[7]的研究,该范围内的去除函数可认为是稳定的,基本满足一般非球面元件的加工需求。此范围外的去除函数因

受到磁通密度变化的影响其体去除率和  $0^\circ$  下的体去除率差距会更大,不能认为去除函数是等效的,因此  $\theta_{\min}$  和  $\theta_{\max}$  的值分别取  $-12^\circ$  和  $12^\circ$ 。

### 4.3 带倾角的球面加工实验

对一块口径为  $84 \text{ mm} \times 84 \text{ mm}$ 、曲率半径为  $300 \text{ mm}$  的熔石英凸球面镜进行加工。在加工时,B轴增加  $12^\circ$  倾斜角的基础偏置,使得元件部分区域超出虚拟轴的加工范围,以验证虚拟轴和机械轴的复合使用工艺。

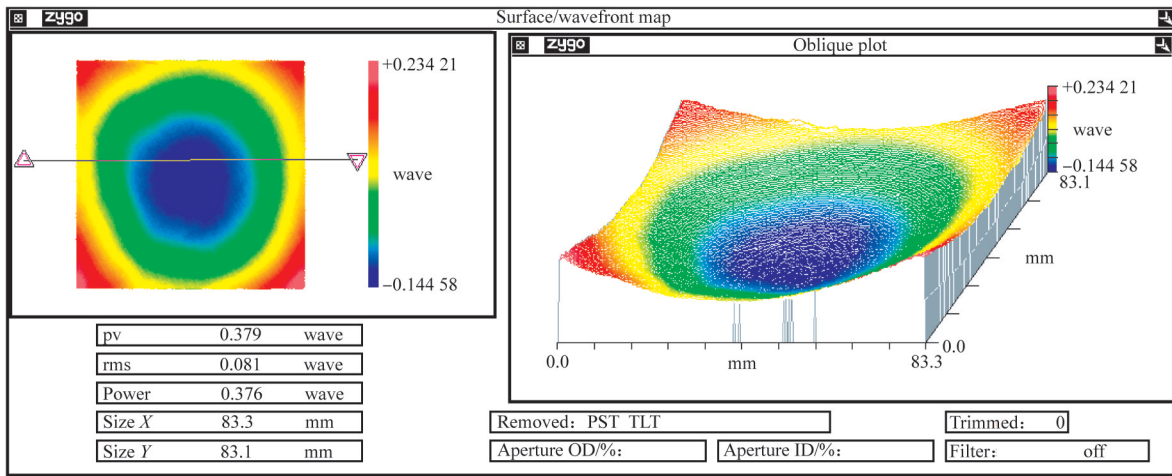


图 11 加工前球面件面形

Fig. 11 Surface figure of spherical parts before processing

去除边缘的倒角区后,该元件的初始全口径面形如图 11 所示,其 PV 值为  $0.379\lambda$ ,RMS 值为  $0.081\lambda$ 。采集去除函数后对初始面形进行仿真加工,路径为光栅线形式,经过一轮仿真加工后,

效果如图 12 所示,其全口径 PV 值收敛到  $0.12\lambda$ ,RMS 值收敛到  $0.0056\lambda$ 。而去除边缘效应后保留 95% 的口径,其 PV 值为  $0.0342\lambda$ ,RMS 值为  $0.0027\lambda$ 。利用 PKC-1000Q2 机床轨迹规划为光

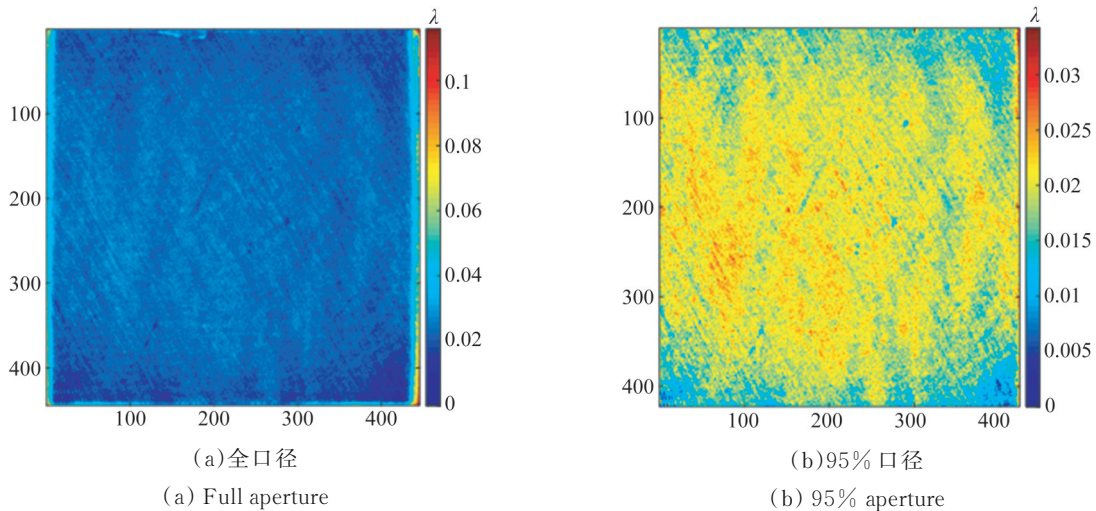


图 12 仿真抛光后面形

Fig. 12 Simulated figure after MRF

栅线路径,加工工艺参数为:抛光轮直径 300 mm,转速 120 r/min,抛光粉为氧化铈颗粒,含水量 14%,流量 1 800 mL/min,室温 22 °C,浸入深度 0.3 mm。经过一轮 10 min 的磁流变抛光后,其 PV 值收敛到 0.219λ, RMS 收敛到 0.017λ。这里

不考虑边缘效应的影响,仅分析 95% 口径的局部区域面形,如图 13 所示,其 PV 值收敛到 0.096λ,收敛效率为 73.98%;RMS 值收敛到 0.012λ,收敛效率为 84.81%。由此验证了本文提出的虚拟轴与机械轴复合的磁流变抛光工艺的有效性。

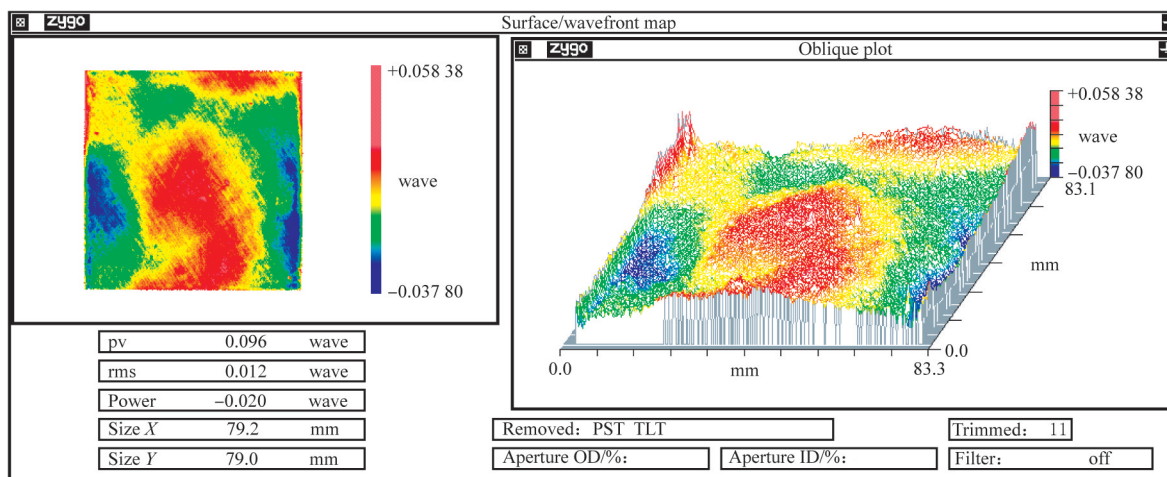


图 13 一轮抛光后 95% 口径的面形

Fig. 13 Surface figure of spherical part for 95% aperture after one round MRF

## 4 结 论

为了提高磁流变抛光工艺对高陡度曲面元件的加工能力,本文针对常规的抛光轮磁场结构,分析了保证去除函数稳定的磁场特点,通过变触点磁场特性和去除函数形态变化确定了虚拟轴的范围,提出了虚拟轴和机械轴的复合使用工艺。该工艺以机械轴作为虚拟轴的辅助轴,将元件超过虚拟轴边界的高陡度部分变换至虚拟

轴范围内,进一步拓展了加工区域,提升了高陡度曲面元件的加工能力,同时降低了完全依赖机械轴所带来的振动和定位误差。实验加工了一块偏置倾角为 12°、曲率半径为 300 mm 的球面工件,将其 95% 口径的面形 PV 值收敛至 0.096λ, RMS 值收敛至 0.012λ。实验结果表明,虚拟轴和机械轴复合的抛光方法具有针对高陡度曲面的修形能力。

## 参考文献:

- [1] 袁征. 保形光学头罩磨削抛光设备研制及其磁流变抛光基础研究[D]. 长沙:国防科学技术大学, 2008.
- YUAN ZH. *Develop grinding and polishing equipment and basic study on magneto-rheological finishing for conformal optics dome*[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2008. (in Chinese)
- [2] 宋辞,戴一帆,彭小强,等. 光学镜面磁流变抛光的后置处理[J]. 光学精密工程, 2010, 18(8):

- 1715-1721.
- SONG C, DAI Y F, PENG X Q, *et al.*. Post processing for magnetorheological finishing of optical mirrors [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, 18(8): 1715-1721. (in Chinese)
- [3] 鲁岩. 一种大摆角五轴联动混联机床的构型设计及性能分析[D]. 太原:中北大学, 2017.
- LU Y. *Research on configuration design and performance of five-axis linkage hybrid kinematics machine with large pendulum angle* [D]. Taiyuan: North University of China, 2017. (in Chinese)
- [4] 周洁,何卫,胡旭晓,等. 四轴联动变刃触点自由

- 曲面磨削算法研究[J]. 机械科学与技术, 2011, 30(6): 951-956.
- ZHOU J, HE W, HU X X, *et al.*. A method for free surface grinding with changing cutter contact points in four-axis CNC machine [J]. *Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering*, 2011, 30(6): 951-956. (in Chinese)
- [5] 毛磊, 何卫, 周洁, 等. 基于曲率拟合及变刀触点的防干涉四轴磨削算法[J]. 中国机械工程, 2011, 22(17): 2022-2026.
- MAO L, HE W, ZHOU J, *et al.*. Curvature fitting and changing-TCpoints based 4-axis grinding algorithm [J]. *China Mechanical Engineering*, 2011, 22(17): 2022-2026. (in Chinese)
- [6] MALONEY C, LORMEAU J P, DUMAS P. Improving low, mid and high-spatial frequency errors on advanced aspherical and freeform optics with MRF[C]. *SPIE*, 2016, 10009: 100090R.
- [7] MESSNER W, HALL C, DUMAS P, *et al.*. Manufacturing meter-scale aspheric optics [J]. *SPIE*, 2007, 6671: 667106.
- [8] SONG C, DAI Y F, PENG X Q. Magnetorheological finishing of low-gradient curved surfaces based on four-axis linkage technique [J]. *Journal of Central South University*, 2013, 20(9): 2349-2358.
- [9] 李龙响. 大口径非球面磁流变加工的关键技术研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2016.
- LIL X. *Study on the key techniques of magnetorheological finishing for large aspheric optics* [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2016. (in Chinese)
- [10] 宋辞. 离轴非球面光学零件磁流变抛光关键技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2012.
- SONG C. *Study on the key techniques of magnetorheological finishing for off-axis aspheric optical elements* [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2012. (in Chinese)
- [11] 郑永成, 王洋, 何建国, 等. 基于磁场分割的磁导计算与磁路设计[J]. 机械与电子, 2006, 24(7): 11-13.
- ZHENG Y CH, WANG Y, HE J G, *et al.*. Permeance calculation and magnetic circuit design based on magnetic field division [J]. *Machinery & Electronics*, 2006, 24(7): 11-13. (in Chinese)
- [12] 赵翔宇. 六自由度机械臂及其控制系统的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2019.
- ZHAO X Y. *Research on 6-DOF manipulator and its control system* [D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2019. (in Chinese)
- [13] 周涛, 张云飞, 樊炜, 等. 磁流变抛光回转对称非球面工件精确自定位[J]. 光学精密工程, 2020, 28(3): 610-620.
- ZHOU T, ZHANG Y F, FAN W, *et al.*. Precise localization of rotary symmetrical aspheric workpiece in magnetorheological polishing [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2020, 28(3): 610-620. (in Chinese)
- [14] 黄金勇, 赵恒, 胡庆, 等. 大口径平面光学元件波前梯度数控抛光[J]. 光学精密工程, 2019, 27(7): 1473-1480.
- HUANG J Y, ZHAO H, HU Q, *et al.*. Large aperture optical element wavefront gradient controlled by computer numerical controlled polishing [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2019, 27(7): 1473-1480. (in Chinese)
- [15] CHENG H B, FENG Z J, CHENG K, *et al.*. Design of a six-axis high precision machine tool and its application in machining aspherical optical mirrors [J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2005, 45(9): 1085-1094.
- [16] 袁巨龙, 吴喆, 吕冰海, 等. 非球面超精密抛光技术研究现状[J]. 机械工程学报, 2012, 48(23): 167-177.
- YUAN J L, WU ZH, LÜ B H, *et al.*. Review on ultra-precision polishing technology of aspheric surface [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2012, 48(23): 167-177. (in Chinese)
- [17] SALZMAN S. *Optimal magnetorheological fluid for finishing of chemical-vapor-deposited zinc sulfide* [D]. Rochester: University of Rochester, 2016.
- [18] 周涛, 黄文, 陈华, 等. 基于ICP的磁流变抛光方形工件精准定位方法[J]. 制造技术与机床, 2019(7): 43-47.
- ZHOU T, HUANG W, CHEN H, *et al.*. Precise localization of square workpiece in magnetorheological polishing based on ICP algorithm [J]. *Manufacturing Technology & Machine Tool*, 2019(7): 43-47. (in Chinese)
- [19] 尹韶辉, 邓子默, 郭源帆, 等. 单晶碳化硅的电磁场励磁大抛光模磁流变抛光[J]. 表面技术, 2020, 49(10): 309-315.
- YIN S H, DENG ZH M, GUO Y F, *et al.*. Mag-

- netorheological polishing using large polishing tool excited by electromagnetic field for silicon carbide wafer [J]. *Surface Technology*, 2020, 49 (10) : 309-315. (in Chinese)
- [20] MORE A K, CHANMANWAR R M. Experimental investigation of magnetorheological finishing on copper alloy[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2019, 19: 312-316.
- [21] 舒成松,董浩,尹韶辉,等. 高精度微结构玻璃光学元件阵列模压技术研究进展[J]. *光学精密工程*, 2020, 28(9): 1967-1985.
- SHU CH S, DONG H, YIN SH H, *et al.*. Research progress of high precision micro structure glass optical element array molding technology[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2020, 28 (9) : 1967-1985. (in Chinese)
- [22] 张欢. 基于磁流变抛光法的光学元件抛光专利技术综述[J]. *科技创新与应用*, 2019(20):5-6.
- ZHANG H. Overview of the patented technology of optical element polishing based on magnetorheological polishing method[J]. *Science and Technology Innovation and Application*, 2019(20):5-6. (in Chinese)
- [23] 周琴琴,彭可,陈永福,等. 基于环形磁场励磁的多工位磁流变抛光方法[J]. *制造技术与机床*, 2019(7): 105-111.
- ZHOU Q Q, PENG K, CHEN Y F, *et al.*. Multi-stationmagnetorheological polishing method based on ring magnetic field excitation[J]. *Manufacturing Technology & Machine Tool*, 2019(7) : 105-111. (in Chinese)
- [24] 罗斌,阎秋生. 磁流变抛光非球柱面镜的新工艺[J]. *金刚石与磨料磨具工程*, 2019, 39(2) : 64-71.
- LUO B, YAN Q SH. New technology to magnetorheological finishing aspheric cylindrical mirror [J]. *Diamond & Abrasives Engineering*, 2019, 39 (2) : 64-71. (in Chinese)

## 作者简介:



张 韬(1996—),男,安徽宿州人,硕士研究生,2018年于天津大学获得学士学位,研究方向为先进装备制造与应用。E-mail: zhangtao18@gscaep.ac.cn

## 导师简介:



何建国(1965—),男,重庆人,研究员,硕士生导师,主要从事先进光学制造检测理论与技术的研究。E-mail: hjg6s@caep.com

## 通讯作者:



樊 炜(1983—),男,副研究员,硕士生导师,2007年于华中科技大学获得学士学位,2012年于中国科学院数学与系统科学研究院获得博士学位,主要研究方向为复杂曲面数字化制造与超精密加工技术。E-mail: weifan1127@hust.edu.cn