

# 基于多轴刀路轨迹的自由曲面磁粒研磨试验

赵耀耀, 陈松, 李昌龙, 李鑫, 李雨龙

(辽宁科技大学 机械工程与自动化学院, 辽宁 鞍山 114051)

**摘要:** **目的** 通过自由曲面的磁粒研磨试验, 使工件表面经研磨后能够获得较好的表面形貌, 降低工件的表面粗糙度。**方法** 使用 UG 生成曲面三维模型, 利用后处理功能, 生成包含刀具位置和姿态的刀位文件, 提取刀位文件中原始的刀路轨迹点, 分析刀路轨迹, 利用曲率的临界值提取轨迹的特征点。采用积累弦长参数化法对提取的轨迹特征点进行三次 B 样条插值, 对比插值前后轨迹点拟合曲线在  $z$  轴的误差, 再根据刀轴矢量计算机械臂末端姿态。选择磁极的不同开槽方式, 并在 Ansoft Maxwell 软件里进行仿真模拟和分析, 选定理论上较优的球形开槽磁极形式。通过试验加工铝合金自由曲面, 对比研磨前后的表面形貌和表面粗糙度。**结果** 使用积累弦长参数法进行 3 次 B 样条插值, 获得了步长较为均匀的轨迹点, 优化了原始刀位轨迹。在球形磁极上进行开槽, 使均匀磁场变为非均匀磁场, 同时使最大磁感应强度由 0.556 T 增至 0.727 T, 增大了磁粒研磨过程中的研磨力。对铝合金曲面的部分区域进行 60 min 的研磨, 其表面平均粗糙度从原始的  $Ra\ 8.71\ \mu\text{m}$  降至  $Ra\ 0.56\ \mu\text{m}$ 。**结论** 将磁粒研磨与六自由度机械臂结合, 进行曲面的光整加工, 可以有效改善工件的表面质量, 降低其表面粗糙度。

**关键词:** 磁粒研磨; 表面光整加工; 自由曲面; 六轴机械臂; 三次 B 样条插值

**中图分类号:** TG580.68 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2023)04-0319-10

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2023.04.028



扫码查看文章讲解

## Test on Magnetic Abrasive Finishing of Free-form Surface Based on Multi-axis Tool Path Trajectory

ZHAO Yao-yao, CHEN Song, LI Chang-long, LI Xin, LI Yu-long

(School of Mechanical Engineering & Automation, University of Science and Technology Liaoning, Liaoning Anshan 114051, China)

**ABSTRACT:** The work aims to obtain a better surface morphology and reduce the surface roughness of the workpiece through the magnetic abrasive finishing test of the free-form surface. UG was used to generate 3D surface model, and the processing module was entered after setting of the tool type, machining allowance and other pre-processing. The post-processing function

收稿日期: 2022-04-28; 修订日期: 2022-08-26

Received: 2022-04-28; Revised: 2022-08-26

基金项目: 国家自然科学基金(51775258); 辽宁省教育厅项目(2020FWDF07); 辽宁省教育厅项目(2020FWDF05); 辽宁科技大学基金(2018FW05)

**Fund:** National Natural Science Foundation of China (51775258); Liaoning Provincial Department of Education Project (2020FWDF07); Liaoning Provincial Department of Education Project (2020FWDF05); Fund Project of University of Science and Technology Liaoning (2018FW05)

**作者简介:** 赵耀耀(1997—), 男, 硕士生, 主要研究方向为精密加工与特种加工。

**Biography:** ZHAO Yao-yao (1997-), Male, Postgraduate, Research focus: precision and special processing.

**通讯作者:** 陈松(1976—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为精密加工与特种加工。

**Corresponding author:** CHEN Song (1976-), Male, Doctor, Associate professor, Research focus: precision and special processing.

**引文格式:** 赵耀耀, 陈松, 李昌龙, 等. 基于多轴刀路轨迹的自由曲面磁粒研磨试验[J]. 表面技术, 2023, 52(4): 319-328.

ZHAO Yao-yao, CHEN Song, LI Chang-long, et al. Test on Magnetic Abrasive Finishing of Free-form Surface Based on Multi-axis Tool Path Trajectory[J]. Surface Technology, 2023, 52(4): 319-328.

was adopted to confirm the tool path, and obtain the standard tool position file including the tool position and attitude. The original path point of the tool was obtained after removal of the machining G code. The curvature value was obtained through the approximate solution of the three-point method, the mean value of curvature was set as the threshold for distinguishing feature points from non-feature points and the feature points from the original trajectory were drawn with the critical value of curvature. Cubic B-spline interpolation was performed on the feature points by the accumulated chord length parameterization. The corresponding coordinate values were extracted from the digital module and compared with the original point and the interpolation point, thus analyzing the error of the curve fitted in the  $z$  axis. Then, the posture of the end of the manipulator was calculated according to the tool axis vector. The different slot methods of magnetic pole were simulated and analyzed in Ansoft Maxwell software, and the better spherical slot magnetic pole form in theory was selected to increase the lapping force. The surface topography and surface roughness of aluminum alloy before and after grinding were compared through tests. By accumulating chord length parameter method for cubic B-spline interpolation, the trajectory points with uniform step length were obtained, and the initial tool path was optimized. To a certain extent, the disadvantage of the large difference in the stroke of the end effector at the same time was improved. Slotted was carried out on the spherical magnetic pole to change the uniform magnetic field into a non-uniform magnetic field, and at the same time, magnetic induction intensity of 20 mm diameter area at a distance of 2 mm from the magnetic pole increased from 0.556 T to 0.727 T, and on the grinding track with the same distance and length of 30mm, the change of the magnetic induction intensity gradient was increased, which increased the grinding force during the process of magnetic abrasive finishing. The above methods were used to grind the aluminum alloy and the surface roughness decreased from original average surface roughness of  $8.38 \mu\text{m}$  to  $3.37 \mu\text{m}$  after 20 minutes of grinding. Then, after continuous grinding for 40 minutes, the average surface roughness decreased from  $3.37 \mu\text{m}$  to  $0.56 \mu\text{m}$ . By observing the surface topography with super depth of field, it can be found that the spherical melt produced by WEDM on the original workpiece is removed, indicating that combined magnetic abrasive finishing of six degree of freedom manipulator and the optimized five-axis machining tool path can effectively improve the surface quality of the workpiece and reduce the surface roughness. Therefore, a new method is tried for the finishing of free-form surfaces.

**KEY WORDS:** magnetic abrasive finishing; surface finishing; free-form surface; six-axis manipulator; cubic B-spline interpolation

由于自由曲面具有优良的空气动力学、流体动力学等特性,因此在航空航天、汽车、船舶等领域中许多核心零部件均采用复杂曲面构造<sup>[1-2]</sup>。为了保证强度,一部分大型曲面(如整体叶盘)通过整体铸造获得,另一部分(如内置流道的航空发动机叶片)则采用增材制造技术<sup>[3-4]</sup>。由于采用铸造和增材技术获得的工件表面质量难以达到工作要求,因此都需对其再进行磨抛,以改善其表面质量。

国内外针对复杂曲面的光整加工进行了诸多研究。张琳等<sup>[5]</sup>针对复杂曲面的磁粒研磨,设计了一种磁粒研磨加工工具,可以根据压力的大小调节研磨间隙,但是该加工工具的通用性较差。芦亚萍等<sup>[6]</sup>将超声与磁粒研磨结合,在数控铣床上对模具自由曲面进行复合研磨,得到了理想的表面质量,但仍未解决因曲率的连续变化导致的工件与磨具接触面积忽大忽小问题,使得研磨效果降低。赵玉刚等<sup>[7]</sup>为了进行复杂曲面的磁粒研磨加工,设计了三坐标数字化磁粒光整加工系统,可以根据工件的实际形状自动编程规划路径,但对于大型曲面的加工有一定难度。Liu等<sup>[8]</sup>在分析机体和运动单元等基础上设计了四周联动MRF机床,实现了小曲率凹面的精密加工。该方法

类似于使用多轴数控铣床,但是在实际生产中成本较高,很难推广使用。上述研究都对曲面进行了磨抛加工,但是在通用性、效率、成本及被加工工件尺寸等问题上很难得到均衡解决。

磁粒研磨光整加工是一种针对工件表面的特种加工技术,它为柔性加工技术,具有自锐性好、加工质量高、去除量小、易于实现自动化等特点,被广泛应用<sup>[9-10]</sup>。王兴祥<sup>[11]</sup>研究发现,在自由曲面的光整加工中,由于曲率变化使得回转轴线与曲面法线存在倾斜角度,因而磁粒研磨加工的效果不理想。由此,文中提出一种自由曲面的磁粒研磨方法,基于多轴铣削的刀路轨迹使得磁极始终垂直于曲面,通过格式置换使机械臂运行刀路轨迹达到自由曲面的高效高质量加工,并结合成本、效率、通用性等关键问题,探索一种曲面磁粒研磨光整加工方法。

## 1 研磨轨迹的生成

### 1.1 研磨轨迹的规划原理

研磨轨迹的处理及规划基于五轴铣床刀具轨迹。在5轴数控铣床上对曲面进行加工,机床工件坐标系

刀轴始终垂直于曲面表面, 如图 1 所示。若将刀具看成磁粒研磨的磁极头, 则刀具的刀尖即为磁研磨过程中磁极头的中心。

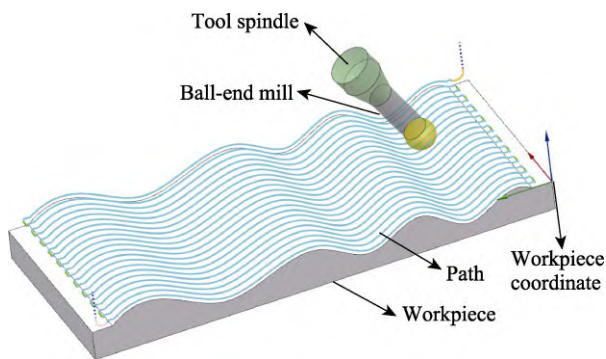


图 1 曲面铣削  
Fig.1 Surface milling

工业机械臂通常具有 6 个自由度, 每个关节包含 1 个自由度, 前 3 个关节决定末端空间位置, 后 3 个关节决定末端位姿<sup>[12]</sup>。五轴加工中心包含 5 个自由度, 类似于工业机械臂, 前 3 个决定位置, 后 2 个决定刀具位姿。两者的运动指令都由位置和姿态 2 组数据组成, 因此两者运动指令的格式可以进行转换。区别在于六自由度机械臂末端有 3 个变量, 五轴加工中心只有 2 个变量, 机械臂多出的那个姿态变量可以忽略, 所以可以根据刀路文件进行扩展, 生成磁极头的研磨轨迹。

### 1.2 研磨轨迹的处理

UG 生成的刀位文件在笛卡尔空间中, 如果在关节空间进行轨迹规划, 则 6 个关节角需要按照运动学逆解求解, 过于复杂<sup>[13]</sup>, 因此文中在笛卡尔空间对机械臂的轨迹进行规划, 轨迹规划流程如图 2 所示。

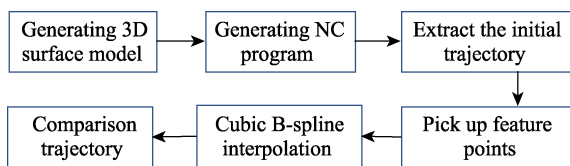


图 2 轨迹规划流程  
Fig.2 Trajectory planning process

在笛卡尔空间对机械臂的轨迹进行规划, 主要为获得平稳的末端进给运动。原始刀位的轨迹点如图 3 所示, 轨迹点之间的弦长差距较大, 2 个刀路点之间分割的弦长不相等, 末端执行器在同样时间内行走的步长不一样, 使得末端执行器的速度忽快忽慢, 最终导致表面光整加工质量不均匀, 因此需要对刀路轨迹点重新进行规划。

特征点决定曲线的形状, 所以先提取刀路中的特征点, 然后根据特征点进行插值拟合。针对离散点的插值拟合方式有很多种, 如多项式插值可以解决关节

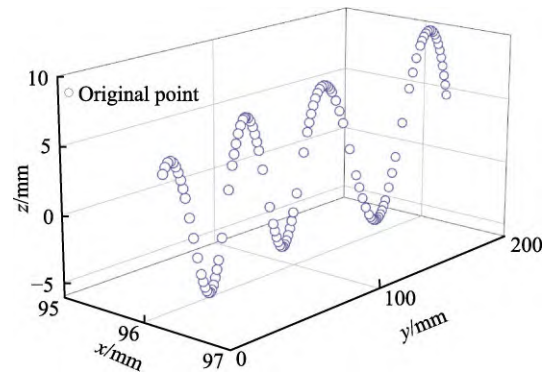


图 3 原始刀路的轨迹点  
Fig.3 Original tool path point

角速度和角加速度的突变问题。对于笛卡尔空间坐标系, 需要逆解关节角, 其计算量较大。采用样条插值可以获得较为平滑的轨迹曲线, 但对于稀疏离散点的插值拟合效果不好。B 样条插值是一种常用于曲线曲面的数学模型, 经常应用于 CAD、CAE、CAM 中, 是曲面图形处理行业标准的一部分, 对于离散点的插值拟合有极大的精度和灵活性。文中的多轴刀路离散点数据在 UG 中则由 B 样条函数表达, 所以使用 B 样条函数进行插值拟合。

文中基于曲率对一系列的空间点进行特征点的划分。离散曲线点曲率的计算较为复杂, 在这里采用近似法求解, 数值计算如式 (1) 所示<sup>[14]</sup>, 即经过空间上 3 个不共线的点可确定曲率半径。曲率是曲率半径的倒数。

$$\rho_i = \frac{\left| \frac{d_i d_{i+1}}{d_i d_{i-1}} \left| \frac{d_i d_{i+1} - d_i d_{i-1}}{2 |d_i d_{i+1} \times d_i d_{i-1}|} \right| \right|}{2 |d_i d_{i+1} \times d_i d_{i-1}|} \quad (1)$$

式中:  $\rho_i$  为曲率半径;  $d_{i-1}$ 、 $d_i$ 、 $d_{i+1}$  为空间上相邻的 3 个轨迹点。

曲率的计算结果如图 4 所示。对于特征点的提取, 通常采用给定阈值来区分特征点和非特征点。这里采用韩江等<sup>[15]</sup>提出的用曲率平均值  $k_{avg}$  代替曲率极值的方法来提取特征点, 在计算各点曲率值的基础上, 将各个轨迹点按照  $k_{avg}$  进行划分, 超过  $k_{avg}$  的即

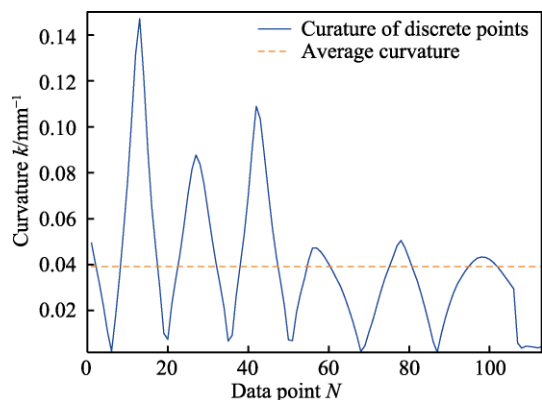


图 4 离散点的曲率求解  
Fig.4 Curvature solution of discrete points

为特征点。如图4所示， $N$ 为数据点， $k$ 为曲率，超过橙色虚线的则为特征点。

已知曲线离散点中的特征点，然后利用三次B样条进行插值，B样条的递推如式(2)所示。

$$p(u) = \sum_{i=1}^n D_i N_{i,k}(u) \quad i = 0, 1, \dots, n \quad (2)$$

式中： $D_i$ 为控制多边形的顶点； $N_{i,k}$ 是由节点矢量 $U$ 按照Cox—DeBoor递推公式定义的 $k$ 次B样条基函数<sup>[16]</sup>。

在对特征点进行三次B样条插值时，需要先确定数据参数化方式。文中分别采用均匀化参数法和累积弦长参数化法进行三次B样条的计算<sup>[17]</sup>。通过2种参数化法进行的曲线插值拟合结果如图5所示。

由插值结果可知，虽然均匀插值化参数法的计算过程简单，拟合曲线与控制多边形的相似性较高，但插值出来的曲线在某些地方出现了尖点。通过累积弦长参数化法进行插值的结果表明，其曲线过渡相较于均匀化参数法更平滑，且未出现曲率变化较大尖点。经分析发现，采用均匀参数化法插值更适合边长相差不大的多边形，对于曲率连续变化的离散点插值拟合的结果较差，因此文中选择累积弦长参数化法进行离散点的插值拟合。

为了保证插值前后轨迹的精确度，需要对插值前后的轨迹点进行误差计算。由于插值前后轨迹点数量

不一致，且无法直接进行误差计算，所以文中根据插值后的 $y$ 坐标值在数模中提取相对应的 $x$ 坐标值进行对比，同条刀路下的 $x$ 值不变。插值前后拟合曲线在 $z$ 轴上的差值如图6所示，插值前后轨迹点分布对比结果如图7所示。

在磁粒研磨光整加工中，研磨间隙是影响加工质量的重要因素之一。如果研磨间隙变化较大，则会导致磁极干涉，或者研磨压力不足，使得最终的研磨效果不理想。通过计算发现，重新规划轨迹点在 $z$ 轴上的最大差值为0.3 mm，磁研磨加工的间隙为2~3 mm，通过间隙避免工件与磁极发生干涉，也保证了研磨压力。

### 1.3 姿态与坐标变换

提取刀路文件里的后3位刀轴矢量来计算位姿<sup>[18]</sup>，设坐标系 $QLMN$ 在磁极头中心，用 $A$ 、 $B$ 、 $C$ 表示坐标系 $QLMN$ （如图8所示）在工件坐标系下的转角，坐标系 $QLMN$ 位置是在工件坐标系下的坐标值。由于刀轴的矢量对应坐标系 $QLMN$ 的 $N$ 轴，因此 $\tau_N = [a_x \ a_y \ a_z]^T$ ，只需计算 $\tau_L$ 和 $\tau_M$ 就可获得磁极的姿态。 $\tau_M$ 为磁极前进方向的切向矢量。记 $Q$ 的下一个轨迹点为 $P$ ，则 $\tau_M$ 近似计算得到 $\tau_M = PQ = [o_x \ o_y \ o_z]^T$ ， $\tau_L$ 是 $\tau_M$ 和 $\tau_N$ 的乘积， $\tau_L = [n_x \ n_y \ n_z]^T$ ，求得 $A$ 、 $B$ 、 $C$ 的值，见式(3)。

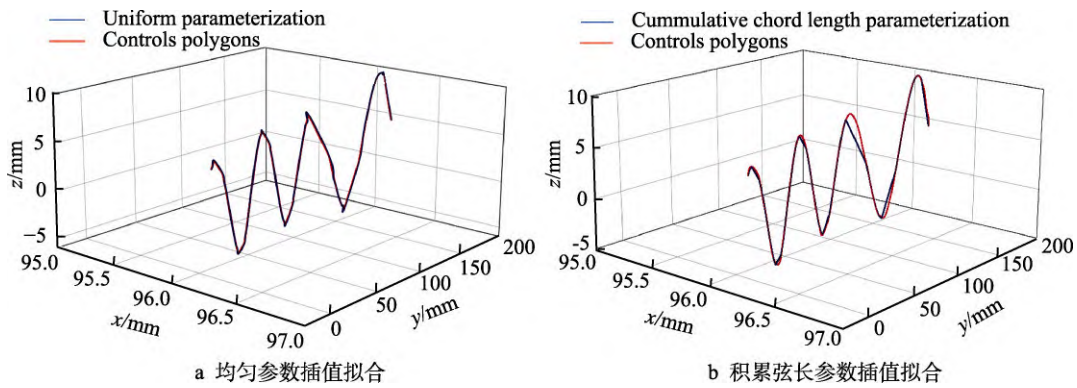


图5 B样条插值结果  
Fig.5 B-spline interpolation results: a) uniform parameter interpolation; b) accumulated chord length parameter interpolation fitting

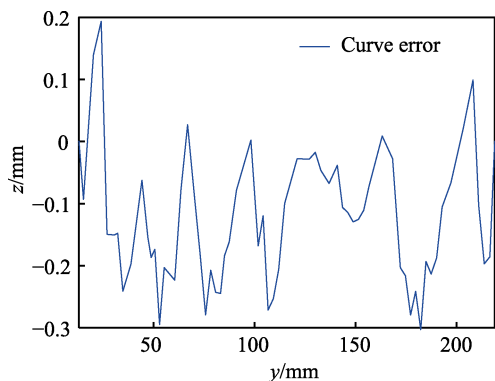


图6 曲线插值 $z$ 轴误差  
Fig.6  $z$  axis error of curve interpolation

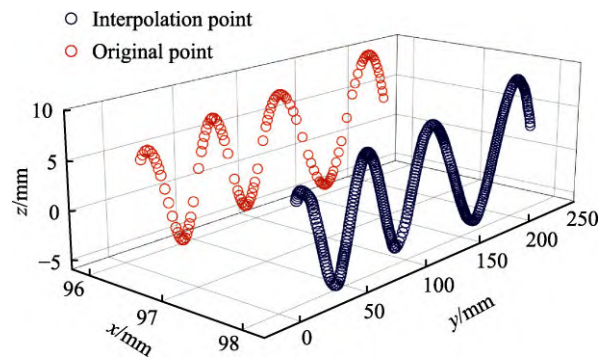


图7 插值结果对比  
Fig.7 Comparison of interpolation results

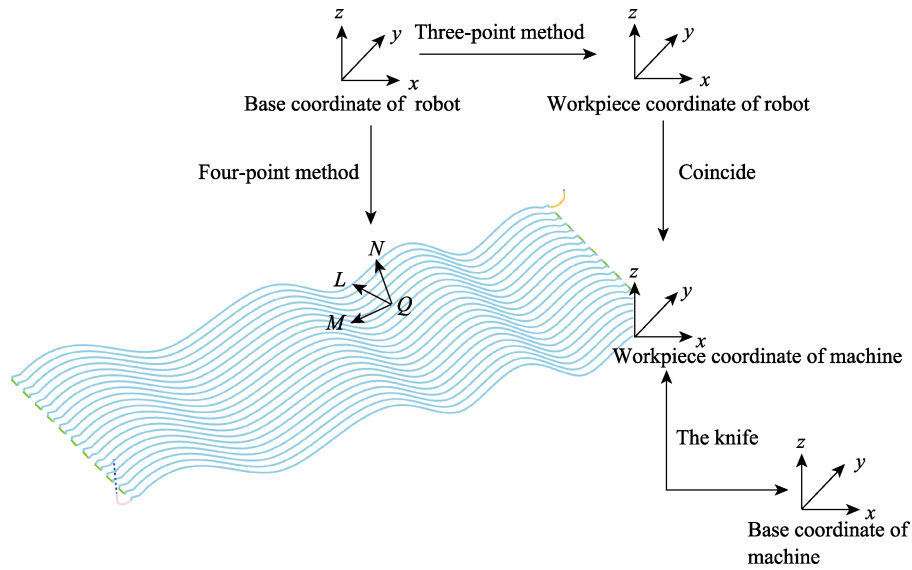


图 8 QLMN 坐标  
Fig.8 QLMN coordinate

$$\begin{cases} A = a \tan 2(n_y, n_x) \\ B = a \tan 2(-n_z, \cos A \cdot n_z + \sin A \cdot n_y) \\ C = a \tan 2(\sin A \cdot a_x - \cos A \cdot a_y, -\sin A \cdot o_x + \cos A \cdot o_y) \end{cases} \quad (3)$$

将磁极头的位置与位姿结合, 获得机械臂研磨曲面的轨迹。

在机械臂里有工件坐标系和工具坐标系, 机床有机床坐标系和工件坐标系。通过对刀确定工件在机床坐标系中的位置, 而 UG 生成刀路轨迹时已经确定了工件坐标系。在机械臂中存在完整的编程示教系统, 通过示教器标定机械臂中的工件坐标系。在实验时将机械臂的工件坐标与机床的工件坐标重合, 最终实现完整的机床刀路轨迹至机械臂轨迹的转换。

## 2 磁极优化和仿真分析

### 2.1 磁极设计

磁粒研磨光整加工的原理如图 9 所示, 磁性磨料

被磁极吸附, 且在磁力的作用下, 沿着磁力线形成磁力刷<sup>[19-20]</sup>。在磁粒研磨光整加工中影响加工效果的因素有许多, 磁极头的结构形式是其中之一<sup>[21]</sup>。合适的磁极可以有效提高磁感应强度、改善磨料的更新速度, 最终提高光整加工后的表面质量。对于曲面加工, 这里选择球形磁极<sup>[22]</sup>。

磁性磨料的研磨力来源于沿着磁力线方向的作用力  $F_x$  和垂直于磁力线方向的作用力  $F_y$  的合力<sup>[23-24]</sup>, 它们的表达式如式 (4) 所示。

$$F = \sqrt{F_x^2 + F_y^2} = V \chi \sqrt{\left(\frac{\partial H}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial H}{\partial y}\right)^2} \quad (4)$$

式中:  $V$  为磁性磨料体积,  $m^3$ ;  $\chi$  为磁性磨料的磁化率;  $\frac{\partial H}{\partial Y}$  为沿方向  $x$  和  $y$  的磁场强度梯度。

从式 (4) 中发现, 当磁性磨料的磁化率和体积一定时, 磁性磨料所受的磁场作用力与磁场强度梯度成正比, 因此需要增大磁极的磁场强度梯度变化量。陈春增等<sup>[25]</sup>已经证明, 通过开槽可以改善磁极的磁场

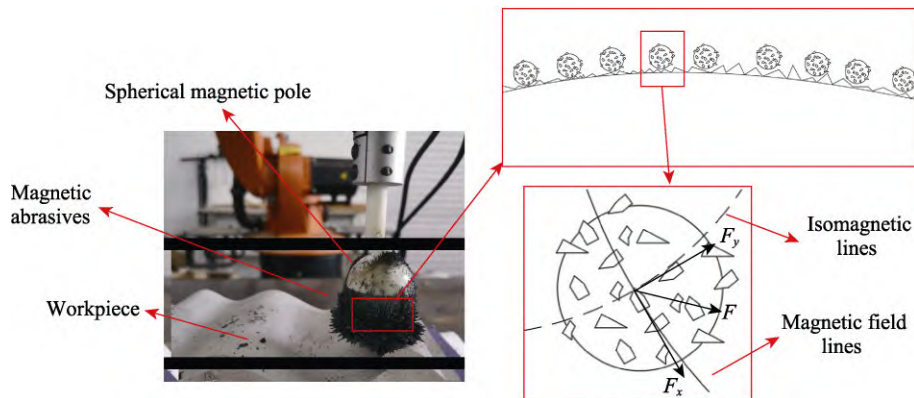


图 9 曲面磁研磨原理  
Fig.9 Principle of magnetic abrasive finishing of free-form surface

强度梯度。由此，文中在 Ansoft Maxwell 里对距离磁极 2 mm 处的直径 20 mm 的圆形区域进行磁感应强度模拟。球形磁极的直径为 30 mm、槽深为 2 mm、宽度为 2 mm，2 种开槽方式分别为一字开槽和十字开槽，球形磁极的材料为钕铁硼。

## 2.2 磁极仿真结果

不开槽球形磁极如图 10 所示，2 种开槽球形磁极如图 11—12 所示。

仿真结果表明，不开槽球形磁极的最大磁感应强

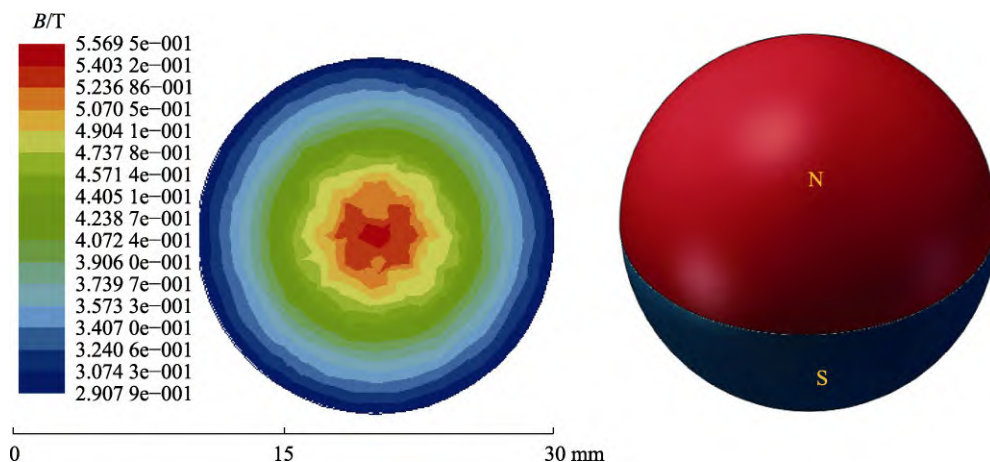


图 10 不开槽磁感应强度和模型

Fig.10 Magnetic induction intensity and model of pole without slot

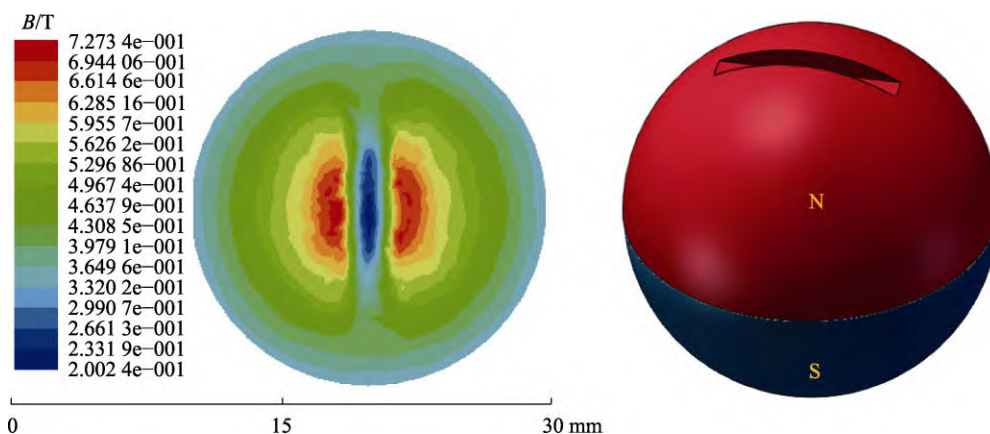


图 11 一字开槽磁感应强度和模型

Fig.11 Magnetic induction intensity and model of pole with straight shape slot

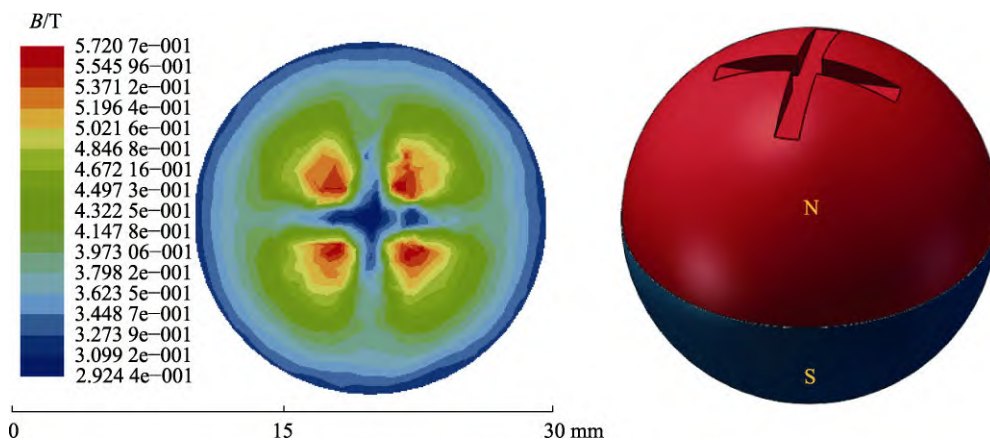


图 12 十字开槽磁感应强度和模型

Fig.12 Magnetic induction intensity and model of pole with cross shape slot

度为 0.556 T, 均匀分布; 一字型开槽的球形磁极的最大磁感应强度为 0.727 T, 最大磁感应强度出现在开槽棱边; 十字形开槽的球形磁极的最大磁感应强度为 0.572 T, 最大磁感应强度出现在开槽边侧。

通过开槽使得槽口附近具有不沿直径的磁场强度梯度, 在磁粒研磨光整加工过程中, 沿着直径的磁场强度梯度对研磨力的增加无明显作用<sup>[26]</sup>。更大的磁场梯度变化有利于磁性磨料的翻转、滚动和更新, 缩短了单颗磨料的研磨时间, 提高了磁性磨料的整体使用寿命和研磨质量。然后对距离磁极 2 mm 处轨迹的磁场强度进行了仿真, 如图 13 所示, 模拟加工区域的磁场感应强度, 纵坐标为磁场感应强度, 横坐标为距离球形磁极中心处的距离。

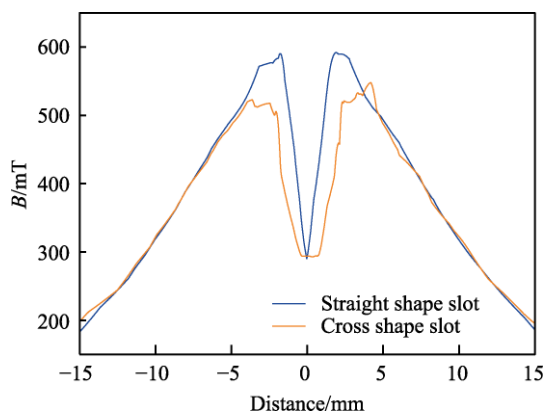


图 13 2 种开槽形式下轨迹上磁感应强度  
Fig.13 Magnetic induction intensity on the trajectory under two slotted forms

模拟结果显示, 一字形开槽在该路径上的最大磁场强度为 0.598 T, 最小磁场强度为 0.182 T; 十字形开槽的球形磁极的最大磁场强度为 0.517 T, 最小磁场强度为 0.197 T; 一字形开槽靠近中心处的磁感应强度更大, 且磁场强度梯度变化相较于十字型开槽更大, 这会增大研磨力。

通过开槽产生了磁场的尖点效应, 使得磁极开槽棱边处的磁感应强度大于凹槽内部, 增大了研磨压力。同时磁场梯度的变化更大, 有利于磁性磨料的翻转、滚动和更新。在相同研磨时间内, 缩短了单颗磨料的使用时间, 提高了磁性磨料的使用寿命。由此, 文中采用一字开槽型磁极进行试验。

### 3 实验与分析

#### 3.1 装置

机械臂曲面磁粒研磨加工装置如图 14 所示。加工装置由六自由度机械臂、电主轴及球形磁极等组成。电主轴带动磁性磨料绕着回转轴做旋转运动, 六自由度机械臂带动电主轴做垂直于工件表面的进给运动, 以达到对工件表面进行研磨加工的目的。

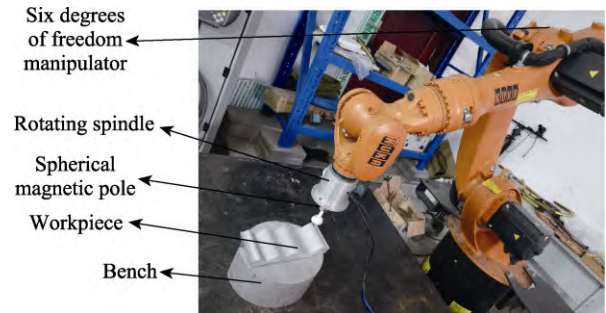


图 14 六自由度机械臂曲面研磨装置  
Fig.14 Surface grinding device for 6 DOF manipulator

#### 3.2 实验环境

磁粒研磨试验条件见表 1。

表 1 试验条件

Tab.1 Test conditions

Names	Experimental conditions
Workpiece	6061 Aluminum alloy
Workbench	Kuka kr16
Shape of magnetic pole head	Spherical
Abrasive particle size	187 $\mu\text{m}$
Grinding gap	2 mm
Speed of magnetic pole	800 r/min
Processing time	60 min

工件尺寸为 200 mm×90 mm 的铝合金曲面。磁性磨料是由铁与三氧化二铝按照一定比例混合, 再通过加压成型干燥, 最后烧结而成, 其平均粒径为 187  $\mu\text{m}$ 。试验的研磨轨迹如图 15 所示。为了对比研磨前后工件表面质量的变化情况, 测量了曲面中最凹、最凸, 以及曲率变化较小的缓坡这 3 个点的粗糙度和微观形貌变化情况。研磨区域及测量点如图 15 所示, 点 1 至点 2 是磁极头的进给方向。

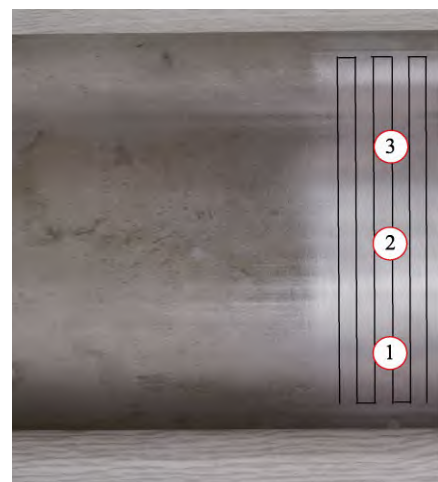


图 15 曲面研磨轨迹  
Fig.15 Free-form surface grinding trajectory

### 3.3 结果与分析

工件3个被测点在研磨前后的表面质量变化情况如图16所示,所有粗糙度值都取3次测量的平均值。首先对其进行20 min的研磨,3个被测点的表面粗糙度由原始的7.96、8.51、8.67  $\mu\text{m}$ 分别降至2.87、3.25、3.98  $\mu\text{m}$ ,由电火花线切割产生的熔融球状颗粒被大量去除。继续研磨加工20 min,3个被测点的表面粗糙度分别降至1.47、1.25、2.21  $\mu\text{m}$ ,球状颗粒基本被去除,但是与前20 min相比,去除效率降低。这是由于工件表面的原始粗糙度较大,在去除一定缺陷后,使得研磨间隙变大,研磨压力降低,因此去除

效果无前20 min明显。接着又对其进行20 min的研磨,3个被测点的粗糙度分别降至0.45、0.35、0.87  $\mu\text{m}$ 。在研磨加工过程中发现,被测点3的研磨效果不及前2个点,这表明在整段研磨轨迹上,前半部分的研磨效果比后半段的研磨效果好。分析原因是在手动将机床的工件坐标系与机械臂的工件坐标系重合时存在一定误差,导致研磨后半段的误差累积、研磨间隙发生改变、研磨压力不足,去除效果无前半段理想。

通过对比上述试验结果(图17)发现,利用提取的刀路轨迹点重新进行研磨轨迹规划,并通过手动示教器使机械臂的工件坐标系与机床的工件坐标系重合,利用开槽的球形磁极对曲面进行磁粒研磨光整

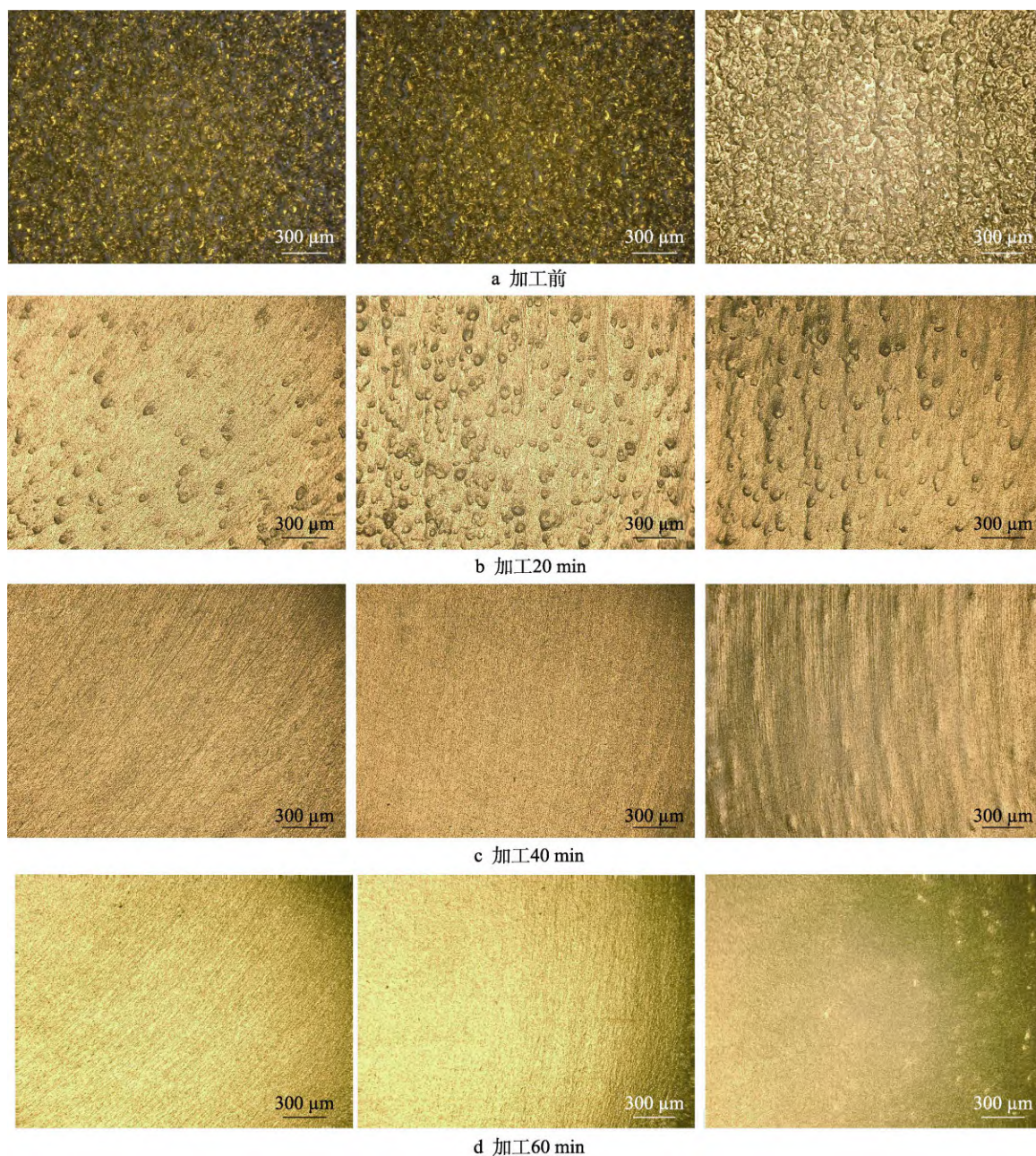


图16 加工前后表面质量的对比

Fig.16 Comparison of surface quality before and after processing: a) before processing; b) processing for 20 minutes; c) processing for 40 minutes; d) processing for 60 minutes



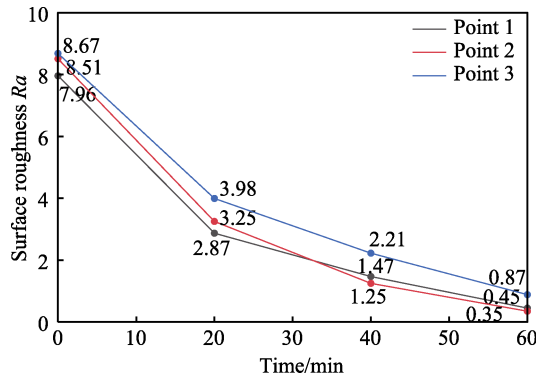


图 17 工件表面粗糙度对比

Fig.17 Comparison of workpiece surface roughness

加工, 可以达到降低曲面表面粗糙度、改善表面形貌的目的。

## 4 结语

原始刀路轨迹点之间的步长差距较大, 导致机械臂末端在相同时间内的行程不一致, 速度忽快忽慢, 从而影响了磁粒研磨光整加工的效果。通过提取特征点, 重新规划轨迹点, 使得两点之间的步长差距缩小, 改善了机械臂末端步长差距较大的状况。

不同形状的磁极头适应不同形状的工件, 仿照球形铣刀, 文中采用球形磁极头, 可以适应曲面不同的曲率轮廓。对于较大曲率的曲面, 应选择直径较小的球形磁极, 避免在姿态变化过程中发生干涉。磁极头开槽可以改变磁场强度分布, 文中模拟分析了 3 种磁极形式。结果表明, 开槽后磁极的最大磁感应强度由 0.556 T 增至 0.772 T, 磁场变为非均匀磁场, 且一字开槽比十字开槽的最大磁感应强度更集中, 磁场强度梯度变化更大。

通过实验验证, 在工业机械臂中使用多轴机床铣削路径进行曲面的磁粒研磨, 同时选择合适的磁极形式并开槽, 可以提高工件表面质量, 降低工件的表面粗糙度, 为自由曲面表面光整加工提供了一种新的加工方式。

### 参考文献:

- [1] 张士宏, 程明, 宋鸿武, 等. 航空航天复杂曲面构件精密成形技术的研究进展[J]. 南京航空航天大学学报, 2020, 52(1): 1-11.  
ZHANG Shi-hong, CHENG Ming, SONG Hong-wu, et al. Research Progress on Precision Forming Technology for Complex Curved Surface Components in Aerospace[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2020, 52(1): 1-11.
- [2] 周志雄, 周秦源, 任莹晖. 复杂曲面加工技术的研究现状与发展趋势[J]. 机械工程学报, 2010, 46(17): 105-113.

- ZHOU Zhi-xiong, ZHOU Qin-yuan, REN Ying-hui. Current Research and Development Trends of Complex Surface Machining Technology[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(17): 105-113.
- [3] 李世昊, 王目孔, 孙建新, 等. 薄壁曲面航天结构件无模铸造工艺研究[J]. 铸造技术, 2018, 39(12): 2735-2738.  
LI Shi-hao, WANG Mu-kong, SUN Jian-xin, et al. Research on Mouldless Casting Process of Thin-Wall Curved Aerospace Structure[J]. Foundry Technology, 2018, 39(12): 2735-2738.
- [4] 高航, 彭灿, 王宣平. 航空增材制造复杂结构件表面光整加工技术研究及进展[J]. 航空制造技术, 2019, 62(9): 14-22.  
GAO Hang, PENG Can, WANG Xuan-ping. Research Progress on Surface Finishing Technology of Aeronautical Complex Structural Parts Manufactured by Additive Manufacturing[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2019, 62(9): 14-22.
- [5] 张琳, 赵吉宾, 李论. 复杂曲面磁力研磨加工方法研究[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2014(1): 129-131.  
ZHANG Lin, ZHAO Ji-bin, LI Lun. Magnetic Abrasive Finishing Method Research of Complex Curved Surface[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2014(1): 129-131.
- [6] 芦亚萍, 张军强, 马季, 等. 模具自由曲面的超声磁粒复合研磨研究[J]. 电加工与模具, 2007(3): 59-62.  
LU Ya-ping, ZHANG Jun-qiang, MA Ji, et al. The Study on Ultrasonic Magnetic Abrasive Finishing (UMAF) Control System[J]. Electromachining & Mould, 2007(3): 59-62.
- [7] 赵玉刚, 周锦进. 复杂曲面三坐标数字化磁粒光整加工控制系统[J]. 山东机械, 2001(3): 23-25.  
Zhao Yu-gang, Zhou Jin-jin. Three-Coordinate Digital Magnetic Particle Finishing Control System for Complex Curved Surface[J]. Shandong Machinery, 2001(3): 23-25.
- [8] LIU He-nan, CHEN Ming-jun, YU Bo, et al. Configuration Design and Accuracy Analysis of a Novel Magnetorheological Finishing Machine Tool for Concave Surfaces with Small Radius of Curvature[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2016, 30(7): 3301-3311.
- [9] 刘文浩, 陈燕, 李文龙, 等. 磁粒研磨加工技术的研究进展[J]. 表面技术, 2021, 50(1): 47-61.  
LIU Wen-hao, CHEN Yan, LI Wen-long, et al. Research Progress of Magnetic Abrasive Finishing Technology[J]. Surface Technology, 2021, 50(1): 47-61.
- [10] KANG Jun-mo, YAMAGUCHI H. Internal Finishing of Capillary Tubes by Magnetic Abrasive Finishing Using a Multiple Pole-Tip System[J]. Precision Engineering, 2012, 36(3): 510-516.
- [11] 王兴祥. 基于自由曲面磁性研磨永磁磁极头开发与实验研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2003: 76-77.  
WANG Xing-xiang. Development of Permanent Magnetic

- Poles Based on Freeform Surface Finishing and Experimental Studies on Their Working Performance[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2003: 76-77.
- [12] 雷晓敏. 基于 CAD/CAM 的工业机器人切削加工离线编程技术研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2012: 19-21.  
LEI Xiao-min. Industrial Robot Machining Technology Research Based on CAD/CAM[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2012: 19-21.
- [13] 陈浣, 王建平, 李晓峰. 基于 CAD/CAM 技术的机器人连续轨迹规划[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2009(8): 29-32.  
CHEN Huan, WANG Jian-ping, LI Xiao-feng. Trajectory Planning for Industrial Robots Based on CAD/CAM Software[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2009(8): 29-32.
- [14] 梁子龙, 丁毓峰. 一种自由曲面抛光机器人轨迹规划方法[J]. 机械科学与技术, 2018, 37(10): 1489-1495.  
LIANG Zi-long, DING Yu-feng. A Trajectory Planning Method for Free-Form Surface Polishing Robot[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2018, 37(10): 1489-1495.
- [15] 韩江, 江本赤, 夏链, 等. 基于轮廓关键点的 B 样条曲线拟合算法[J]. 应用数学和力学, 2015, 36(4): 423-431.  
HAN Jiang, JIANG Ben-chi, XIA Lian, et al. A B-Spline Curve Fitting Algorithm Based on Contour Key Points[J]. Applied Mathematics and Mechanics, 2015, 36(4): 423-431.
- [16] 吴玉香, 王鹏. 基于曲线长度自调整速度方程的非均匀有理 B 样条插补算法[J]. 计算机集成制造系统, 2019, 25(9): 2256-2264.  
WU Yu-xiang, WANG Peng. NURBS Interpolation Algorithm of Self-Adjusting Feedrate Equation Based on Curve Length[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2019, 25(9): 2256-2264.
- [17] 于辉. 参数曲线数据点参数化方法的研究[D]. 济南: 山东大学, 2009: 10-12.  
YU Hui. Research on Parameterization Methods for Data Points on Parametric Curve[D]. Jinan: Shandong University, 2009.
- [18] 缪东晶, 王国磊, 吴聊, 等. 自由曲面均匀喷涂的机器人轨迹规划方法[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2013, 53(10): 1418-1423.  
MIAO Dong-jing, WANG Guo-lei, WU Liao, et al. Trajectory Planning for Freeform Surface Uniform Spraying[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2013, 53(10): 1418-1423.
- [19] 徐立军, 王文, 杨诚. 磁力研磨加工技术综述[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2003(1): 41-43.  
XU Li-jun, WANG Wen, YANG Cheng. Review of the Magnetic Abrasive Finishing[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2003(1): 41-43.
- [20] 赵文聪, 张桂香, 陈春增. 磁力光整加工永磁极结构参数设计及仿真[J]. 机械设计与研究, 2016, 32(6): 106-109.  
ZHAO Wen-cong, ZHANG Gui-xiang, CHEN Chun-zeng. Design and Simulation Research of the Magnetic Poles' Structure Parameters on Magnetic Abrasive Finishing System[J]. Machine Design & Research, 2016, 32(6): 106-109.
- [21] LU cong da, GONG xiao jun, JIA Hong, et al. Study on the Fluid Magnetic Abrasive Polishing Technology[J]. Advanced Materials Research, 2010, 102/103/104: 495-501.
- [22] 赵玉刚, 周锦进, 金洙吉, 等. 自由曲面磁粒光整加工的研究[J]. 电加工, 1999(2): 18-22.  
ZHAO Yu-gang, ZHOU Jin-jin, Zhao Yu-gang et al. Study on Magnetic Abrasive Finishing of Free Form Surface[J]. Electromachining & Mould, 1999(2): 18-22.
- [23] 王琰. 磁性磨料在磁力研磨加工中受磁场力作用的研究[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2007(5): 37-39.  
WANG Yan. Study on Magnetic Force of Magnetic Abrasive in Magnetic Abrasive Finishing[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2007(5): 37-39.
- [24] 王杰, 陈燕, 吕旖旎, 等. 开槽仿形磁极在轴承内圈滚道光整中的应用[J]. 电镀与精饰, 2020, 42(5): 32-37.  
WANG Jie, CHEN Yan, LYU Yi-ni, et al. Application of Slotted Profiling Magnetic Pole in Bearing Inner Ring Groove Finishing[J]. Plating & Finishing, 2020, 42(5): 32-37.
- [25] 陈春增, 张桂香, 赵玉刚, 等. 磁力研磨加工永磁极设计及仿真研究[J]. 制造技术与机床, 2016(1): 35-39.  
CHEN Chun-zeng, ZHANG Gui-xiang, ZHAO Yu-gang, et al. Design and Simulation Research of Permanent Magnetic Pole on Magnetic Abrasive Finishing[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2016(1): 35-39.
- [26] 叶恒宇, 梁存真, 覃寿同. 磁极开槽情况对磁力研磨的影响[J]. 机械设计与制造, 2018(4): 101-103.  
YE Heng-yu, LIANG Cun-zhen, QIN Shou-tong. Effect of Magnetic Pole Groove on Magnetic Abrasive Finishing[J]. Machinery Design & Manufacture, 2018(4): 101-103.

责任编辑: 彭颖