



·强激光物理与技术·

机器人气囊抛光去除函数稳定性分析*

林泽文^{1,2}, 王振忠^{1,2}, 黄雪鹏^{1,2}, 孔刘伟²

(1. 厦门大学 机电工程系, 福建 厦门 361005; 2. 厦门大学 深圳研究院, 广东 深圳 518057)

摘要: 基于气囊抛光技术和工业机器人平台开发光学元件精密抛光系统,既能满足光学元件快速抛光环节的高效率和高精度的要求,又可以降低开发成本,是极具潜力的抛光设备开发方案。气囊抛光具有稳定的且确定的材料去除特性,通常要求抛光斑稳定性在 90% 左右。针对机器人气囊抛光系统在多步离散进动抛光过程中机器人末端刚度对气囊抛光稳定性的影响展开研究,通过建立机器人末端刚度矩阵,获得机器人末端变形;基于 Preston 理论,建立含变形误差的气囊抛光去除函数。最后设计 4 步离散定点抛光实验验证机器人气囊抛光系统稳定性。根据结果可知抛光斑在 XY 截面轮廓线上皆呈类高斯形状,且 XY 截面轮廓线基本一致,具有比较好的重合度;对比不同抛光位置的截面轮廓线,其相对误差小于 5%,由此可验证机器人气囊抛光系统在离散进动抛光时具有较好的稳定性。

关键词: 气囊抛光; 工业机器人; 刚度矩阵; 去除函数; 抛光实验

中图分类号: TH161

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202133.200293

Influence of robotic structural deformation on bonnet polishing removal function

Lin Zewen^{1,2}, Wang Zhenzhong^{1,2}, Huang Xuepeng^{1,2}, Kong Liuwei²

(1. Xiamen University, Xiamen 361005, China;

2. Shenzhen Research Institute of Xiamen University, Shenzhen 518057, China)

Abstract: Precision polishing system for opticals based on bonnet polishing technology and industrial robot can not only meet the requirements of high efficiency and precision of rapid polishing, but also reduce the development cost, thus it is a potential development solution for polishing. Bonnet polishing requires stable and deterministic material removal characteristics, and the stability of polishing spot is usually around 90%. The influence of robot stiffness on the stability of robot bonnet polishing system in the process of multi-step discrete precession polishing was studied. The robot end deformation was analyzed by the stiffness matrix, and the removal function of bonnet polishing with deformation error was established based on Preston theory. Finally, a four-step discrete polishing experiment was designed. According to the results, the polishing spot was Gaussian on the xy section contour line, and the xy section contour line was basically the same, with a good coincidence degree. Comparison of the cross-section profiles at different polishing positions indicates, the relative errors are below 5%. The experiment proves that the robot bonnet polishing system has a good stability in discrete precast polishing.

Key words: bonnet polishing; industrial robot; stiffness matrix; removal function; polishing experiment

气囊抛光技术^[1-10]是一种新兴的抛光技术,其原理是以充气球冠型橡胶气囊作为抛光工具,采用特殊的进动抛光方式。其具有抛光效率高、加工精度高、柔性好等优点,广泛应用于非球面光学元件、复杂曲面模具等的抛光过程。国外,英国伦敦大学与 ZEEKO 公司合作开展了对气囊抛光技术的大量研究^[1-4],成功研发 IRP 系列气囊抛光机床;国内,厦门大学^[5-10]和哈尔滨工业大学^[11-12]也开展了研究,厦门大学基于气囊抛光技术特点和关键技术的研

* 收稿日期:2020-10-26; 修订日期:2021-04-02

基金项目:深圳科技计划项目(JCYJ2018030617)

作者简介:林泽文(1995—),男,硕士,从事机器人精密抛光研究。

通信作者:王振忠(1981—),男,博士,从事先进光学制造研究。

究结果,成功研制5轴气囊抛光机床BP-2MK460。

现有对气囊抛光技术的研究大部分在机床结构下开展,但是开发精密抛光机床存在成本极高,开发周期长,而且运动控制复杂等问题,不利于技术的推广应用。工业机器人因具有柔性高、适应性强、易控制且成本低等优点,使其在加工领域的应用越来越广。针对高精度元件的机器人抛光技术的研究,D.D Walker^[12]使用机器人抛光系统抛光铝合金镜面,表面质量达到Sa 5 nm;浙江工业大学计时鸣团队^[13-15]利用工业机器人平台搭载磁控式气囊抛光工具,在金属模具抛光上取得了较高的抛光效率和均匀纹理。

工业机器人由于本体结构刚度低,在抛光过程中容易受力发生变形,末端的结构变形均将直接影响气囊抛光的效果;而且机器人末端刚度与姿态相关,不同的抛光姿态会导致不相等的变形量。对于气囊抛光,为了获得良好的表面质量,通常采用离散进动抛光方式,如图1所示。相对于整面单步抛光,多步离散下的机器人姿态具有更大的差异,末端结构变形更加难以预测,从而影响气囊抛光的稳定性。根据5轴气囊抛光机床的实际应用,为了保证气囊抛光的准确性,通常要求抛光斑稳定性在90%左右。因此,本文从机器人末端刚度模型入手,研究机器人在重力和抛光力作用下的结构变形对去除函数稳定性的影响。首先,建立含变形误差的去除函数模型;再通过建立机器人末端刚度模型和HBM测力仪得到变形值与实际压力值,以此计算实际的去除函数,最后,通过实验验证机器人气囊抛光的稳定性。

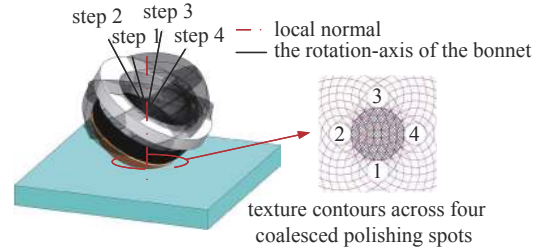


Fig. 1 Schematic diagram of bonnet discrete precession polishing

图1 气囊离散进动抛光示意图

1 机器人气囊抛光系统刚度分析

工业机器人末端受外力作用时易发生机械结构变形,其中末端所受的外力载荷和末端微量变形满足

$$\Delta X = C_\theta F \quad (1)$$

式中: F 为广义力(即包括xyz方向上力和力矩),可表示为

$$F = [F_x \quad F_y \quad F_z \quad M_x \quad M_y \quad M_z]^T \quad (2)$$

ΔX 为广义变形(即包括xyz方向上线位移和角位移),可表示为

$$\Delta X = [\Delta x \quad \Delta y \quad \Delta z \quad \Delta \delta_x \quad \Delta \delta_y \quad \Delta \delta_z]^T \quad (3)$$

C_θ 机器人末端柔度矩阵,是机器人末端刚度矩阵 K_θ 的逆矩阵。

机器人末端刚度矩阵 K 与机器人的雅可比矩阵 J 、力雅可比矩阵 J^T 和关节刚度矩阵 K_θ 相关,可表示为式(4),其中工业机器人各关节的刚度值 K_θ 主要和各关节的机械特性相关。机器人雅可比矩阵 J 和力雅可比矩阵 J^T 为转置关系。

$$K = J^{-T} K_\theta J^{-1} \quad (4)$$

本文采用矢量积法求解建立雅可比矩阵

$$J_i(q) = \begin{vmatrix} z_i \times_i^0 p_n^0 \\ z_i \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} z_i \times_i^0 R^i p_n \\ z_i \end{vmatrix} \quad (5)$$

式中: z_i 表示在基坐标系下第*i*关节的*i*坐标系的Z轴单位向量; p_n 末端坐标系原点相对于*i*坐标系的位置矢量。结合机器人运动学公式,计算可得雅可比矩阵为

$$J = [J \quad J_2 \quad J_3 \quad J_4 \quad J_5 \quad J_6] \quad (6)$$

$$\text{式中: } J_1 = \begin{pmatrix} -s_1(a_2 + a_4 c_{23} - d_4 s_{23} + a_3 c_2) \\ c_1(a_2 + a_4 c_{23} - d_4 s_{23} + a_3 c_2) \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}, J_2 = \begin{pmatrix} -c_1(a_3 s_2 + a_4 s_{23} + d_4 c_{23}) \\ -s_1(a_3 s_2 + a_4 s_{23} + d_4 c_{23}) \\ -(a_3 c_2 + a_4 c_{23} - d_4 c_1 s_{23}) \\ -s_1 \\ c_1 \\ 0 \end{pmatrix}, J_3 = \begin{pmatrix} -c_1(a_4 s_{23} + d_4 c_{23}) \\ -s_1(a_4 s_{23} + d_4 c_{23}) \\ d_4 s_{23} - a_4 c_{23} \\ -s_1 \\ c_1 \\ 0 \end{pmatrix}, J_4 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ -c_1 s_{23} \\ -s_1 s_{23} \\ -c_{23} \end{pmatrix}$$

$$J_5 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ -s_1 c_4 + c_1 s_4 c_{23} \\ c_1 c_4 + s_1 s_4 c_{23} \\ -s_4 s_{23} \end{pmatrix}, J_6 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ s_5 (s_1 s_4 + c_1 c_4 c_{23}) + c_5 c_1 s_{23} \\ c_5 s_1 s_{23} - s_5 (c_1 s_4 - s_1 c_4 c_{23}) \\ c_5 c_{23} - c_4 s_5 s_{23} \end{pmatrix}; s_1 \text{表示 } \sin \theta_1, c_1 \text{表示 } \cos \theta_1, s_{23} \text{表示 } \sin(\theta_2 + \theta_3), c_{23} \text{表示}$$

$\cos(\theta_2 + \theta_3)$, 依此类推; θ_i 表示机器人第 i 关节的关节转动角度。

根据建立的机器人末端笛卡尔刚度矩阵, 可知其末端刚度随着机器人姿态的不同(关节转角不同)而变化。

根据式(1)可知, 为获得末端结构变形量, 除建立刚度矩阵外还需分析抛光过程中末端所受的载荷分布。抛光过程中机器人末端主要受气囊工具本身的重力和抛光区域的反作用力, 如图2所示。其中 O_6 为机器人末端原点, O_G 为机器人末端工具重心, O_t 为气囊球心, P 为任意抛光点, α 为气囊离散抛光的姿态位置角。将末端气囊工具所受的重力等效为过其重心的合力 G , 抛光压力反作用力假设为一恒力 F 。

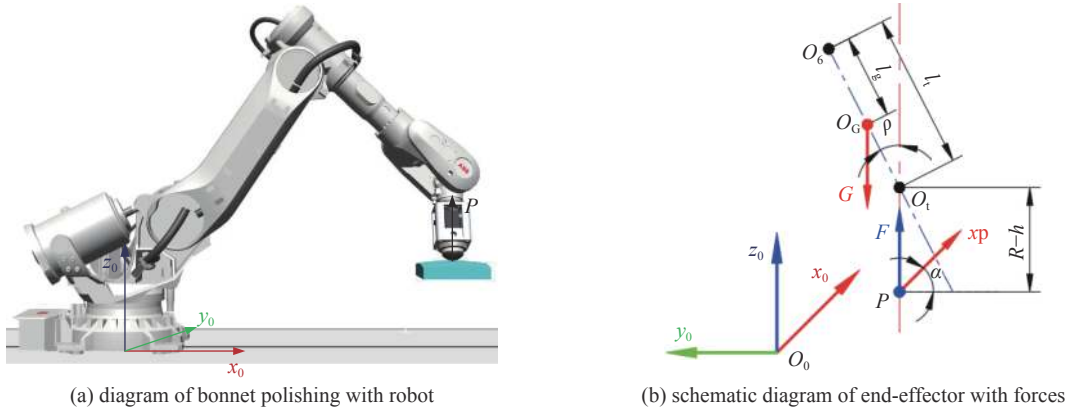


Fig. 2 Force analysis on the end of the bonnet polishing robot

图2 气囊抛光机器人末端受力分析

在操作空间内, 机器人末端受力为

$$\begin{cases} F_x = 0 \\ F_y = 0 \\ F_z = F - G \\ M_x = (Fl_t - Gl_g) \sin \rho \sin \alpha \\ M_y = (Fl_t - Gl_g) \sin \rho \cos \alpha \\ M_z = 0 \end{cases} \quad (7)$$

然后选定抛光点位置, 再确定机器人气囊抛光系统的实际加工参数, 选取气囊抛光下压力为 0.6 mm, 抛光进动角为 20°, 抛光姿态位置角分别为 (0°, 90°, 180°, 270°), 记录机器人关节角 ($\theta_1 \theta_2 \theta_3 \theta_4 \theta_5 \theta_6$) 于表1。根据式(1)~式(7)可得机器人末端变形量, 结果见表2。

结果显示在抛光过程中末端变形主要发生在 z 方向上, 变形量大小顺序为 $\Delta_1 < \Delta_2 = \Delta_4 < \Delta_3$, 即姿态位置角为 0° 的机器人末端变形量最小, 姿态位置角为 90° 和 270° 的机器人为对称姿态, 其变形量相等, 最大变形发生在姿态位置角为 270° 的抛光姿态。

表1 机器人4步定点抛光关节转角

Table 1 Robot fixed-point polishing joint angle in four steps

four × 90° steps	$\theta_1/(\circ)$	$\theta_2/(\circ)$	$\theta_3/(\circ)$	$\theta_4/(\circ)$	$\theta_5/(\circ)$	$\theta_6/(\circ)$
0°	0	32.36	14.80	0	22.84	0
90°	-4.41	39.06	3.48	25.65	51.99	-21.17
180°	0	45.76	-8.29	0	72.53	0
270°	4.41	39.06	3.48	-25.65	51.99	21.17

表 2 机器人末端变形理论计算结果

Table 2 Theoretical calculation results of robot end deformation

four × 90° steps	x direction/mm	y direction/mm	z direction/mm	whole deformation/mm
0°	0.1206	0	-0.2710	0.2966
90°	0.1221	0.0003	-0.2778	0.3034
180°	0.1238	0	-0.2846	0.3103
270°	0.1221	-0.0003	-0.2778	0.3034

2 机器人材料去除函数稳定性分析

机器人刚度随姿态的不同实时变化,在抛光过程中机器人末端受载后主要表现Z方向的变形。而气囊抛光下压量的不同会影响抛光材料去除效果,本节主要研究机器人末端变形对气囊抛光材料去除的影响。过程中适当简化机器人末端变形对气囊材料去除的影响,主要关注末端变形对抛光区域内速度和抛光压力的影响,基于 Preston 方程,得到结构变形对气囊抛光材料去除函数的影响。

2.1 气囊抛光理论去除函数建模

基于 Preston 假设,工件表面材料去除量 d_z 与抛光压力 p , 抛光速度 v 以及比例系数 K 成正比,其中比例系数 K 与抛光环境、抛光液等相关。针对工业机器人与气囊抛光的特点,多采用分步离散进动抛光,其去除函数可表达为

$$dz = \sum_{i=1}^n Kpv \frac{T}{n} \quad (8)$$

式中: T 为驻留时间; n 为离散步数。

根据气囊特殊的进动抛光特点建立气囊进动抛光速度模型,其中半柔性气囊半径为 R ,气囊抛光进动角为 ρ ,气囊抛光过程中主轴速度 ω_H ,下压量 l ,如图 3 建立坐标系: O_1 和 O_2 分别表示气囊球心和接触区圆心, B 是接触区中的任意一点, v_B 为 B 点处有效的抛光速度矢量。

考虑离散抛光过程中各步气囊姿态的不同导致速度方向的不同,则 N 步离散进动抛光,第 i 步抛光姿态下抛光区域内的有效速度分量的表达式为

$$v_{Bi} = |\omega_H| \begin{bmatrix} l_B \cos \alpha_i + y \cos \rho \sin \alpha_i \\ y \cos \rho \cos \alpha_i - l_B \sin \alpha_i \\ 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中: $l_B = (R - l) \sin \rho - x \cos \rho$; α_i 表示第 i 步抛光姿态下的方向角,设定初始抛光姿态 $\alpha_1 = 0$,则 α_i 表达式为

$$\alpha_i = \frac{(i-1)2\pi}{N} \quad (10)$$

且在理想多步离散抛光情况下,各步的抛光区域半径相等,且理论大小计算式为

$$r_T = \sqrt{2Rl - l^2} \quad (11)$$

抛光接触区域压力分布采用有限元仿真(见表 3)与数值拟合建立压力分布模型。首先建立气囊接触模型为非线性接触模型,导入 ANSYS Workbench 求解时需设定相应的非线性选项,保证其运算收敛。

提取接触面压力结果,仿真结果见图 4。随着下压量的增大,接触斑直径不断增大,区域内的最高接触压力 p_{\max} 也迅速增大。

表 3 气囊抛光有限元仿真设定条件

Table 3 Setting conditions of bonnet polishing finite element simulation

bonnet radius/mm	tool offset/mm	precession angle/(°)	inner pressure/MPa	rotation speed/(r·m ⁻¹)
80	0.2, 0.6, 1	20	0.25	1000

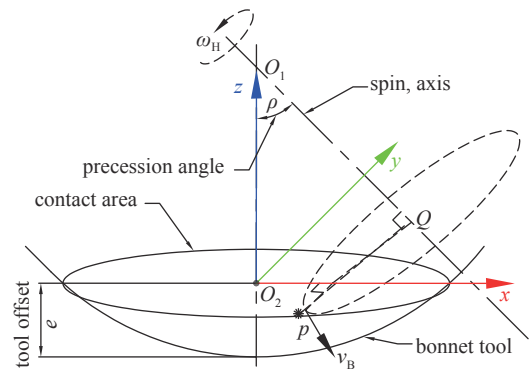


Fig. 3 Bonnet precession polishing speed model

图 3 气囊进动抛光速度模型

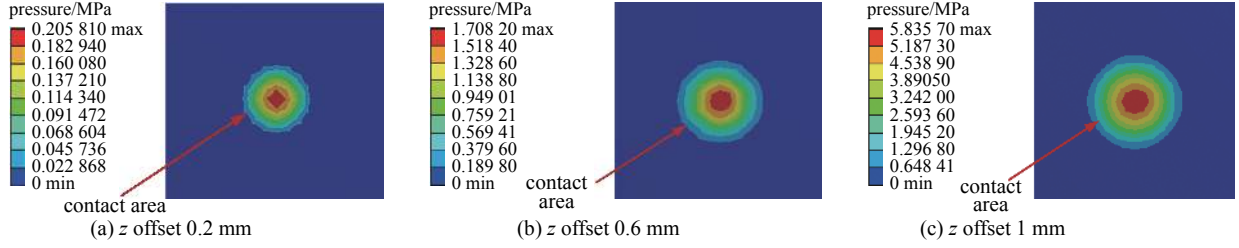


Fig. 4 Simulation of pressure distribution in the bonnet polishing contact area

图4 气囊抛光接触区域压力分布仿真

抛光区域的压力分布呈类高斯分布,进一步采用数值拟合建立压力分布模型,目标函数为类高斯函数见式(12)。采用非线性最小二乘法拟合数据,获得接触区域内压力分布模型。

$$p = p_{\max} \left[\exp\left(-\frac{\lambda^2}{2\sigma^2}\right) \right]^\varphi \quad (12)$$

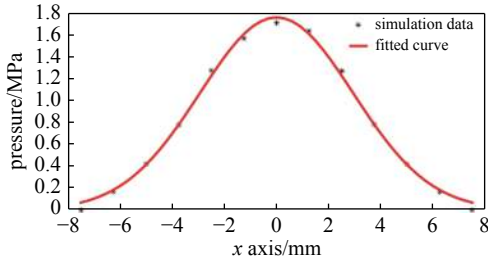
式中: p_{\max} 为最大接触应力; λ 为任意点到中心点的距离; σ 为标准差; φ 为修正系数。

采用下压量 0.6 mm 的仿真数据,使用 Matlab 软件进行数据拟合,其结果如表 4 和图 5 所示。

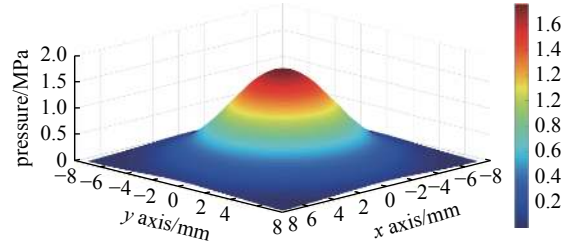
表 4 接触压力数值拟合结果

Table 4 Numerical fitting results of contact pressure

maximum stress/MPa	standard deviation σ	modification coefficient φ
1.708 2	1.231 5	0.175 5



(a) polishing pressure fitting curve of cross section of contact area



(b) diagram of polishing pressure distribution in contact area

Fig. 5 Simulation fitting results of polishing pressure in contact area

图5 接触区抛光压力仿真拟合结果

根据以上步骤获得抛光区域内的速度和压力分布模型,采用归一化方法,建立气囊抛光理论材料去除函数,去除函数呈左右对称如图 6 所示。

2.2 机器人刚度对气囊材料去除函数影响建模

实际抛光过程中,机器人末端变形直接影响机器人末端法兰中心的空间位置,最终导致气囊球心偏离理想位置,产生一定的空间误差。如图 2 所示,气囊工具与机器人末端采用直连方式,可建立气囊球心 C 与机器人末端法兰中心 O_6 的空间变换关系为

$$C \begin{pmatrix} x & y & z & 1 \end{pmatrix} = T(z,d)O_6 \begin{pmatrix} x & y & z & 1 \end{pmatrix}^T \quad (13)$$

式中: $T(z,d)$ 为平移矩阵; d 为机器人末端法兰中心到气囊球心的距离。

可通过上文计算获得的机器人末端变形量获得气囊球心空间位置误差为

$$\Delta\delta \begin{pmatrix} x & y & z & 1 \end{pmatrix}^T = T(z,d)O_6(x+\Delta x,y+\Delta y,z+\Delta z,1)^T - T(z,d)O_6(x,y,z,1)^T = (\Delta x,\Delta y,\Delta z,1)^T \quad (14)$$

式中: $(\Delta x \ \Delta y \ \Delta z)$ 为机器人末端法兰中心的 xyz 方向的变形量。

机器人受力变形导致气囊球心产生位置误差,进而影响抛光点的位置和抛光参数。实际抛光过程中机器人变形量 $(\Delta x \ \Delta y \ \Delta z)$ 对气囊抛光材料去除的影响可将其简化为对抛光速度和接触压力的影响。4 步离散抛光机器人变形对抛光区域影响如图 7 所示。

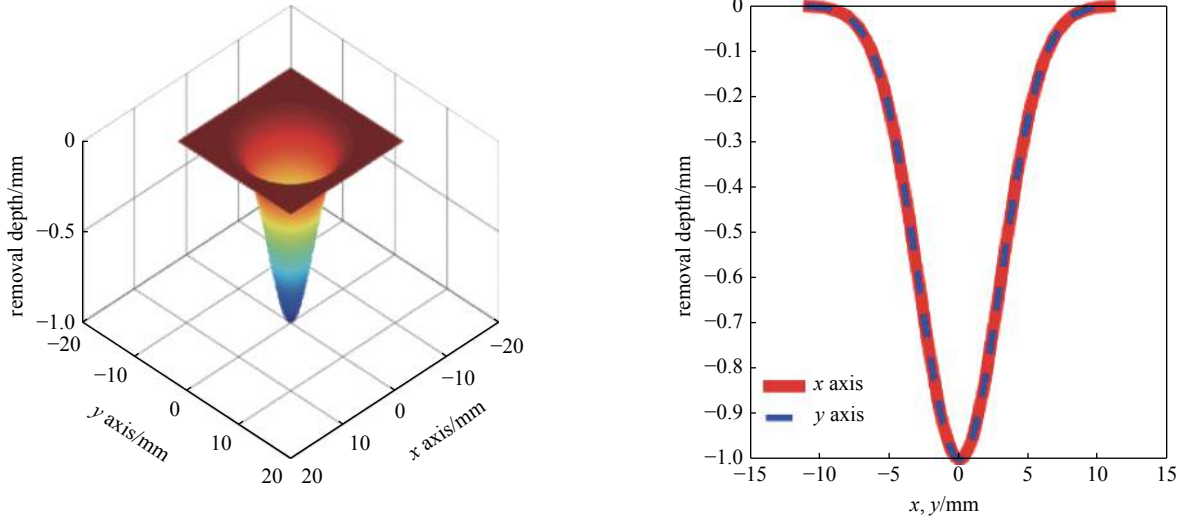


Fig. 6 Simulation modeling of removal function
图 6 去除函数仿真建模

代入误差值,第*i*步抛光的抛光区域理论半径为

$$r_i = \sqrt{2Rl - l^2 + \Delta z_i(2R - 2l - \Delta z_i)} \quad (15)$$

抛光区域大小为

$$d_x = |\max(\Delta x_i + r_i) - \min(\Delta x_j - r_j)| \quad (16)$$

同理可得 d_y 。

对抛光区域内的速度分布影响为

$$v_{Bi} = |\omega_H| \begin{bmatrix} L_1 \cos \alpha_i + L_2 \sin \alpha_i \\ L_2 \cos \alpha_i - L_1 \sin \alpha_i \\ 0 \end{bmatrix}^T \quad (17)$$

式中: $L_1 = (R - l - \Delta z_i) \sin \rho - (x - \Delta x_i) \cos \rho$; $L_2 = (y - \Delta y_i) \cos \rho$ 。

对抛光接触压力分布的影响:拟合获得的压力分布函数需采用实测压力修正接触压力。

$$p_i = \mu_i p_{\max} \left[\exp \left(-\frac{r_i^2}{2\sigma^2} \right) \right]^\varphi \quad (18)$$

式中: $r_i^2 = (x - \Delta x_i)^2 + (y - \Delta y_i)^2$; μ_i 为修正因子; $\mu_i = F_i / F_{\text{simulation}}$; F_i 为实测压力; $F_{\text{simulation}}$ 为接触应力仿真中表面节点中最大的压力值。

因此,工业机器人因刚度不同导致末端产生不同的变形量将直接影响抛光区域内的速度和压力分布,进而影响实际的材料去除。结合式(8)可得实际情况下的去除函数 d_z 表达式为

$$d_z = \sum_{i=1}^n K p_i v_{Bi} \frac{T}{n} \quad (19)$$

2.3 机器人气囊抛光稳定性分析与实验

为分析变形对实际去除函数的影响,首先设计气囊抛光接触压力修正实验,获得不同姿态下接触区域内的实际压力数据修正仿真值。实验使用德国 HBM 公司 S 型 S2M 力传感器和配套软件测量离散姿态下的接触压力,设置传感器采样频率为 300 Hz,精度等级可达 0.02,最小额定量程 10 N。测量平台如图 8 所示,测试条件如表 5 所示,计算获得接触区域内压力平均值,结果如表 6 所示。

分析接触压力测量数据,其结果显示平均压力大小关系为 $F_1 < F_2 \approx F_4 < F_3$,最大抛光压力出现在姿态位置角为 180°的姿态,最小为 0°,姿态位置角 90°和 270°的接触压力相差不大。对比前面计算所得的机器人末端变形数

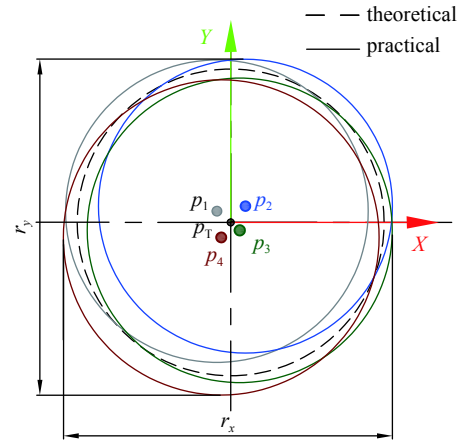


Fig. 7 Schematic diagram of the influence of structural deformation on the polishing area
图 7 结构变形对抛光区域影响示意图

据,由表2可知各姿态下机器人的Z向变形关系为 $\Delta_{z1} < \Delta_{z2} = \Delta_{z4} < \Delta_{z3}$,且Z向的变形均呈现负向变形,即机器人末端变形量越大,气囊下压量越大,则接触压力也随之增大。可知压力修正实验结果与机器人末端刚度计算结果相符合。

基于有限元仿真和压力修正实验结果,可得到离散进动的理论抛光斑大小为 $d_x = 21.77 \text{ mm}$; $d_y = 22.96 \text{ mm}$ 。

经计算,得到含机器人变形误差值后的去除函数结果如图9所示。从仿真结果可得在刚度的影响下,基于4步离散得到的气囊抛光去除函数未见明显的变化,在xy方向的截面形状均保持呈高斯形状,但其因实际抛光点和下压量的变化而产生微量的偏移。

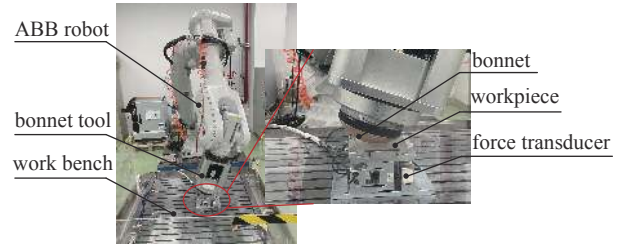


Fig. 8 Contact pressure measurement system

图8 接触压力测量

表5 气囊抛光实验参数

Table 5 Bonnet polishing experiment parameters

bonnet radius/ mm	precession steps	tool offset/ mm	precession angle/(°)	inner pressure/ MPa	rotational speed/(r·min ⁻¹)	dwelt time (each step)/s
80	4	0.6	20	0.25	500	20

表6 静态压力测量结果

Table 6 Static pressure measurement results

(N)

experimental group	F (1st step/0°)	F (2nd step/90°)	F (3rd step/180°)	F (4th step/270°)
1st	105.5	108.7	113.6	105.1
2nd	101.2	106.1	116.6	116.8
3rd	91.4	94.2	103.2	89.3
mean	99.4	103.1	111.1	103.79

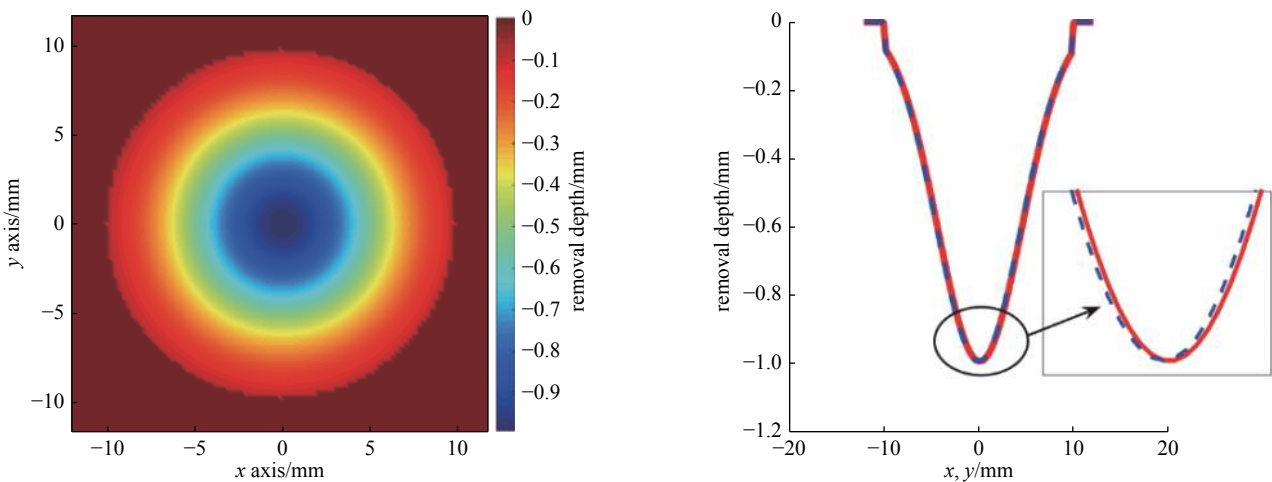


Fig. 9 Simulation result of actual removal function considering end deformation

图9 考虑末端变形的实际去除函数仿真结果

采用4步离散定点抛光实验验证分析结果,实验参数如表5所示,在100 mm×100 mm的BK7光学玻璃的表面4个不同位置定点打斑,各点均相距40 mm。采用ZYGO NV7300白光干涉仪对抛光区域的三维轮廓进行测量,测量结果如图10所示。经过抛光,各个位置抛光斑直径都在15 mm左右,其与理论值存在较大的差别,主要有两个原因:(1)有限元仿真过程中忽略了气囊工具的柔性,且机器人刚度导致的变形存在误差;(2)由于抛光区域边缘去除量少、粗糙度大,ZYGO软件测量过程中边缘区域测量出现坏点,所以测量结果理论存在偏小情况。从测量结果可见不同位置的抛光斑在x,y方向的截面轮廓曲线均呈类高斯形状,且两方向上的轮廓曲线有较高的重合度,符合前文对机器人变形误差对去除函数影响的分析结果,可知姿态不同导致的刚度差异对4步离散抛光的影响较小。

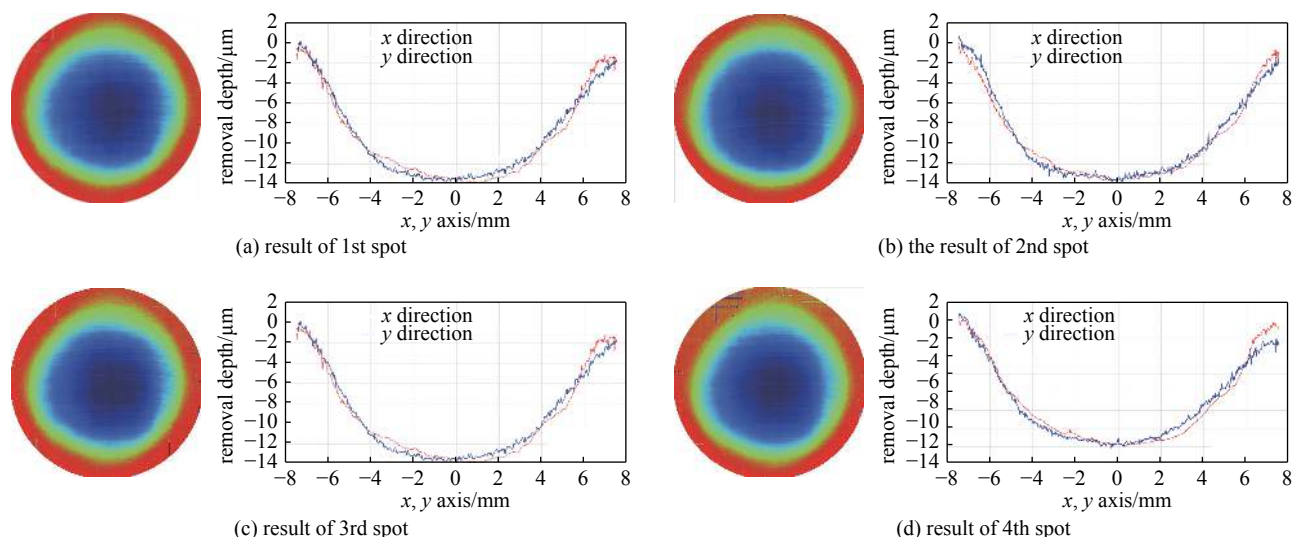


Fig. 10 Measurement results of polishing spots

图 10 不同抛光斑测量结果

除此之外,不同位置上去除函数稳定性是实现实际加工的关键,为了探究机器人气囊离散抛光的稳定性,对比上述4个不同抛光斑内x方向截面的轮廓曲线,如图11所示,各个区域的最大去除深度(峰值, PV),以及相对误差值(以第一个抛光区域的去除深度为基准)见表7。从结果可见不同位置抛光斑去除深度的相对误差值小于5%;4个抛光区域的截面曲线有着很好的一致性,且均呈现左侧边缘略高于右侧情况,主要原因在于工件原始面误差以及加工平台的平面度。由此可见该机器人气囊抛光系统在不同位置的离散抛光具有较高的稳定性,可满足实际抛光应用。

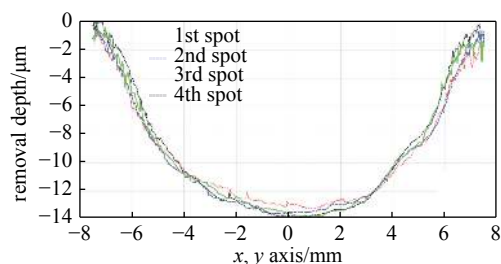


Fig. 11 Comparison of x-direction contour lines of polishing area at different positions

图 11 不同位置抛光区域 x 方向轮廓线对比

表 7 抛光区域去除深度和相对误差值

Table 7 Polished area removal depth and relative error value

experimental group	removal depth/ μm	relative error/%
spot 1	13.249	0
spot 2	13.599	2.64
spot 3	13.864	4.64
spot 4	13.845	4.50

3 结 论

本文结合气囊抛光技术和工业机器人的特点和优势,开发机器人气囊抛光系统,研究机器人末端变形对气囊抛光去除函数的影响,对机器人气囊抛光实际应用具有重要意义。

(1) 基于机器人动力学构造机器人雅克比矩阵,建立机器人刚度模型,获得末端载荷与变形的映射关系;分析气囊抛光时机器人末端载荷分布情况,结合刚度模型计算机器人气囊抛光时末端变形数据。

(2) 基于 Preston 方程建立气囊抛光材料去除函数模型,分析机器人末端变形对于气囊多步离散进动抛光的影响,建立实际抛光的材料去除函数模型。

(3) 设计机器人气囊定点抛光稳定性验证实验,分析定点抛光实验结果。不同位置的单点去除区域的XY方向轮廓曲线具有很好的重合性,对比不同位置的抛光区域最大去除深度,其相对误差小于5%,验证了机器人气囊抛光具有较好的稳定性。

参考文献:

[1] Bingham R G, Walker D D, Kim D H, et al. Novel automated process for aspheric surfaces[C]//Proceedings of SPIE 4093, Current Developments in Lens Design

- and Optical Systems Engineering, 2000: 445-450.
- [2] Walker D D, Brooks D, Freeman R, et al. First aspheric form and texture results from a production machine embodying the precession process[C]//Proceedings of SPIE 4451, Optical Manufacturing and Testing IV. San Diego, CA, USA: SPIE, 2001: 267-276.
- [3] Walker D D, Beaucamp A T H, Bingham R G, et al. Precessions aspheric polishing: New results from the development program[C]//Proceedings of SPIE 5180, Optical Manufacturing and Testing V. California, USA: SPIE, 2003: 15-28.
- [4] 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.
- [5] 潘日, 杨炜, 王振忠, 等. 大口径非球面元件可控气囊抛光系统[J]. *强激光与粒子束*, 2012, 24(6): 1344-1348. (Pan Ri, Yang Wei, Wang Zhenzhong, et al. Controlled bonnet polishing system for large aspheric lenses[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2012, 24(6): 1344-1348)
- [6] Pan Ri, Wang Zhenzhong, Wang Chunjin, et al. Research on control optimization for bonnet polishing system[J]. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2014, 15(3): 483-488.
- [7] Pan Ri, Wang Zhenzhong, Jiang Tao, et al. A novel method for aspheric polishing based on abrasive trajectories analysis on contact region[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 2015, 229(2): 275-285.
- [8] 王春锦, 郭隐彪, 王振忠, 等. 光学元件气囊抛光系统动态去除函数建模[J]. *机械工程学报*, 2013, 49(17): 19-25. (Wang Chunjin, Guo Yinbiao, Wang Zhenzhong, et al. Dynamic removal function modeling of bonnet tool polishing on optics elements[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2013, 49(17): 19-25)
- [9] Wang Chunjin, Yang Wei, Wang Zhenzhong, et al. Dwell-time algorithm for polishing large optics[J]. *Applied Optics*, 2014, 53(21): 4752-4760.
- [10] Wang Chunjin, Wang Zhenzhong, Pan R, et al. Effect analysis of the residual error evaluation method used in bonnet polishing process for aspheric lens[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2013, 69(9): 2505-2511..
- [11] 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)
- [12] 宋剑锋, 姚英学, 谢大纲. 球面光学零件气囊抛光工艺参数优化的研究[J]. *光学技术*, 2014, 40(2): 99-104. (Song Jianfeng, Yao Yingxue, Xie Dagang. Research on the optimization of the process parameters of the bonnet polishing the spherical optical parts[J]. *Optical Technique*, 2014, 40(2): 99-104)
- [13] Li Hongyu, Walker D, Zheng Xiao, et al. Advanced techniques for robotic polishing of aluminum mirrors[C]//Proceedings of SPIE 10692, Optical Fabrication, Testing, and Metrology VI. 2018: 106920N.
- [14] 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)
- [15] Ji S M, Zhang L, Yuan Q L, et al. A novel ballonet polishing tool and its robot control system for polishing the curved surface of mould[J]. *International Journal of Computer Applications in Technology*, 2007, 29(2/4): 212-215.