

基于模糊阻抗控制的机器人气囊抛光 恒力控制系统研究

李路骋 王振忠* 黄雪鹏

厦门大学航空航天学院, 厦门, 361000

摘要: 为保证气囊抛光过程中的接触力恒定, 设计了能够实时调节阻尼系数的模糊阻抗控制机器人气囊抛光恒力控制系统, 进行了机器人气囊抛光恒力控制系统仿真, 仿真结果表明该系统具有较好的接触力收敛效果。开展了平面光学元件和曲面光学元件抛光实验、力/位执行器对比抛光实验, 实验结果表明该系统实现了气囊抛光时接触力的恒定控制, 可将力波动范围控制在 3 N 以内。该控制系统在机器人气囊抛光领域能够有效控制接触力的波动范围, 保证加工后工件表面精度的一致性。

关键词: 气囊抛光; 工业机器人; 恒力控制; 阻抗控制

中图分类号: TG749

DOI: 10.3969/j.issn.1004-132X.2025.05.014

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Research on Constant Force Control System of Robot Bonnet Polishing Based on Fuzzy Impedance Control

LI Lucheng WANG Zhenzhong* HUANG Xuepeng

School of Aerospace Engineering, Xiamen University, Xiamen, Fujian, 361000

Abstract: In order to keep the contact force constant during the bonnet polishing processes, a fuzzy impedance control robot bonnet polishing constant force control system was designed which might adjust the damping coefficient in real time, and the simulations of the robot bonnet polishing constant force control system were carried out. The simulation results show that the system has good contact force convergence. The polishing experiments of planar and curved optical components and the contrast polishing experiments of force/position actuators were carried out. The experimental results show that the system may realize the constant control of the contact forces during the bonnet polishing, and the force fluctuation ranges may be controlled within 3 N. The control system may effectively control the fluctuation ranges of the contact forces in the field of robot bonnet polishing, and ensure the consistency of surface precision for the machined workpieces.

Key words: bonnet polishing; industrial robot; constant force control; impedance control

0 引言

随着光学技术在航空航天、国防军事等领域中的广泛应用, 光学元件对分辨率、光谱范围和散射等性能有更高的要求, 抛光工艺环节作为生产加工的最后一道工序, 深刻影响着加工工件的表面质量、表面一致性、加工稳定性等要素^[1]。

凭借去除效率高、适用性强等特点^[2], 气囊抛光工艺在超精密光学元件加工领域中极具应用潜力。气囊抛光工艺的特点在于采用半球冠状的半柔性气囊工具头作为抛光工具, 并在气囊工具头表面贴附一层聚氨酯抛光垫, 在进行抛光作业时向气囊工具头腔内充入恒定压强的空气, 保持气囊工具头自转轴线与工件抛光区域法线构成固定角度(称为“进动角”), 配合含有磨料的抛光液进行抛光。

目前气囊抛光工艺大多在精密数控机床上实现, 这种机床需要具备 X、Y、Z 三个方向的直线轴与 A、B 两个旋转的摆轴, 再加上气囊工具头的旋转主轴和工件转台的回转轴, 通常组成为 7 轴 5 联动结构^[3]。Zeeko 公司从气囊抛光工艺的抛光机理出发设计出了一系列气囊抛光精密机床, 通过使用半径为 480 mm 的气囊工具头在 4 米级数控机床上加工出 1 m 口径光学元件, 抛光斑直径可达 240 mm^[4]。厦门大学突破了叠层式半柔性气囊工具、进动运动控制算法、全频段误差修正控制策略、去除函数精确建模、在位修整、恒力控制等关键技术并研制出相关型号气囊抛光机床, 可实现非球面元件材料去除率达到 0.1 ~ 30.0 mm³/min, 430 mm × 430 mm 非球面元件面形精度峰谷(PV)值小于 0.5λ(λ 为波长, 取 λ = 632.8 nm), 表面粗糙度均方根(RMS)值小于 1 nm^[5]。哈尔滨工业大学结合气囊内部充气压

力、气囊工具头旋转速度等因素研发出卧式气囊抛光样机^[6]。

气囊抛光机床设备的设计周期长且开发成本高,多轴空间运动插补控制较为复杂,难以实现气囊抛光工艺技术的应用推广。相比之下,工业机器人由于具有自由度高、工作空间范围广、开发成本低等优点在制造领域被广泛应用,因此,将工业机器人应用于气囊抛光加工领域中,不仅可以满足抛光元件的高效率、高精度要求,同时也能够显著降低设计开发成本、简化控制开发程序。

由于工业机器人刚度相较于机床刚度较差,在机器人摆出不同的位姿进行加工时会出现刚度的变化,对于属于接触式加工的气囊抛光,其接触力无法保持恒定,因此工件整体面形质量不一,为解决此问题就必须引入机器人恒力控制技术。机器人恒力控制技术可以划分为被动力控制技术和主动力控制技术。被动力控制的原理是依靠工具头内部机械结构本身的特性被动地调节外部力大小,但该技术无法应用在气囊抛光这种超精密加工领域。主动力控制技术是指机器人系统能够主动地调整其关节运动以抵消外界环境中的力,从而确保维持恒定的力或力矩,属于机器人高精度抛光的主流控制方案,因此选择该方案作为机器人气囊抛光控制方案。为方便对抛光力进行实时采集监控,可选择力/力矩传感器作为力信号的采集设备,通过修正机器人本体位置姿态实现恒力控制。基于此,本文将主动力控制方法作为机器人气囊抛光恒力控制系统的核心,通过智能控制算法实时修正机器人位置姿态,最终实现气囊工具头与工件之间抛光力的稳定控制。

1 机器人恒力抛光控制系统设计

1.1 理论分析与设计依据

气囊抛光工艺作为一种确定性抛光工艺,其

材料去除机理需要遵循确定性抛光去除机理准则,即材料的去除量为去除函数和驻留时间的卷积,因此在设计机器人气囊抛光恒力控制系统时需要结合气囊抛光工艺的去除函数进行分析。由于气囊抛光工艺具有独特的进动抛光方式,其抛光接触区的去除函数轮廓可用有利于面形收敛的高斯型去除函数来表征。为方便计算,KIM等^[7]首次基于Preston方程理论建立气囊抛光静态去除函数模型,该函数模型与实验测量所得的去除函数模型相近。

气囊抛光去除函数模型可用 k' 、 p' 、 v' 三个变量的乘积形式表示,其中 k' 为比例常数,与磨粒形状、抛光液浓度、工件材料性能等有关; p' 为抛光接触点应力,与气囊工具头下压量等有关; v' 为抛光接触区的瞬时抛光速度,与气囊工具头转速、进给速度等有关。故对于安装有气囊工具头的机器人,需要重点考虑气囊工具头下压量以保证抛光点处的应力始终恒定,而气囊工具头下压量与机器人位置姿态强相关,且在气囊抛光点法线位置处的机器人变量会直接影响到气囊工具头下压量,最终导致抛光接触点处应力不稳定,抛光后的工件面形结果不理想。由此可知,需要根据抛光点处接触力大小实时修正机器人末端气囊工具头位置姿态,通过调节气囊工具头下压量来保证气囊工具头与工件接触区的力稳定。

综上,设计出机器人气囊抛光恒力控制系统,该系统包含如下三大控制单元:机器人本体单元(接触力实时采集、机器人加工运动、末端位置修正),气囊抛光工具单元(气囊抛光启停控制、伺服电机转速控制),外部辅助单元(抛光液供给控制、气囊工具头内部气压调节、电磁工作台开/关)。图1为机器人气囊抛光恒力控制系统技术路线图,图2为机器人气囊抛光恒力控制系统实物图。为保证以上控制单元能够精准配合,实现高效、精

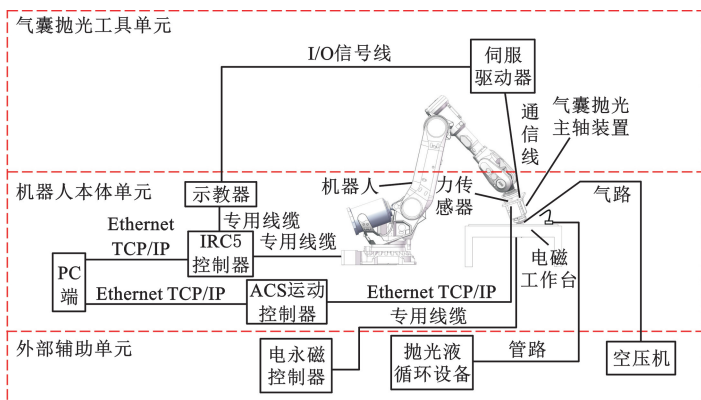


图1 机器人气囊抛光恒力控制系统技术路线图

Fig.1 Technical roadmap of robot bonnet polishing constant force control system

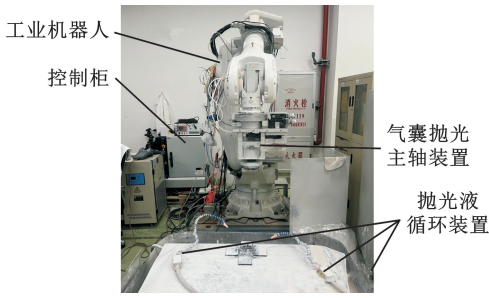


图 2 机器人气囊抛光恒力控制系统实物图

Fig.2 Robot bonnet polishing constant force control system diagram

确的抛光过程,须将相关控制单元集成于 PC 端,在 PC 端内完成气囊抛光恒力加工过程的控制。

1.2 恒力控制算法设计

本系统的恒力控制算法采用基于位置的阻抗控制^[8],其原理是将机器人与环境之间的作用关系视为弹簧-阻尼系统,模型示意图见图 3。机器人模型由质量系数 M 、弹性系数 K 和阻尼系数 B 组成,环境模型则由弹性系数 K_e 和阻尼系数 B_e 定义,该控制系统的目标是调节 M 、 B 、 K 以实现机器人抵达期望位置 X_d ,即便在外部力 F_e (接触力)的作用下机器人实际位置 X 依然能够跟踪到期望位置 X_d ,从而实现力与位移之间的动态平衡,控制方程可表达为

$$F_e = ZE = M\ddot{E} + B\dot{E} + KE \quad (1)$$

式中: Z 为期望阻抗系数; E 为位移量, $E = X_d - X$ 。

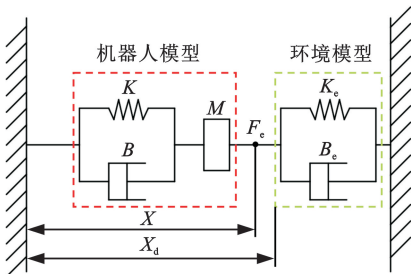


图 3 机器人-环境模型

Fig.3 Robots-environmental models

为简化控制模型,假设机器人的阻抗控制模型在各个维度是解耦的^[9]。在这种假设条件下,便可将该模型从单一维度进行分析,分别设 f_e 、 z 、 e 、 m 、 b 、 k 为 F_e 、 Z 、 E 、 M 、 B 、 K 中的一维元素。在无外力作用下,系统保持在静态平衡状态时 $x = x_d$;当施加外力 F_e 时,系统偏离平衡位置,出现动态响应。连续系统中的 m 、 b 、 k 数值均为正数,因此二阶系统总保持稳定。对机器人控制算法进行编程时,假设任意时刻为 n ,便可将该模型进行基本运动学离散化处理,使其能够预测机器人在下一个时间步长 $(n+1)T$ 的位置和速度。

位移 x 、速度 \dot{x} 和加速度 \ddot{x} 随时间变化的关系可描述为

$$\left. \begin{aligned} x_r((n+1)T) &= x_r(nT) + T\dot{x}_r(nT) \\ \dot{x}_r((n+1)T) &= \dot{x}_r(nT) + T\ddot{x}_r(nT) \\ \ddot{x}_r(nT) &= \ddot{x}_d(nT) + \frac{1}{m}[-f + b(\dot{x}_d(nT) - \dot{x}_r(nT)) + k(x_d(nT) - x_r(nT))] \\ f &= f_e - f_d \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

其中, T 为采样周期, f_e 为实际接触力, f_d 为期望力(一维元素), x_r 、 \dot{x}_r 、 \ddot{x}_r 分别为当前时间步长 nT 的位置、速度和加速度, x_d 、 \dot{x}_d 分别为期望位置和期望速度。通过计算 x_r 和 \dot{x}_r 在时间 T 后的预测值,可以实现对机器人动态行为的连续控制。

由于气囊抛光存在进动角度的特殊性,机器人需要变换多种姿态,对应的机器人刚度同样也会出现变化,恒定的阻抗参数难以获得理想的控制效果,因此需要实时改变阻抗控制参数,保证机器人在加工时的每个点位数据都是根据最优力控制参数设定的,基于此,可通过变阻抗控制方法来提高力控制精度。

进一步地,本文引入模糊控制算法^[10],通过模糊逻辑实时调整阻抗控制参数,以适应复杂多变的气囊抛光环境。相较于质量系数和刚度系数,阻尼系数对控制系统的快速响应和过渡过程的平滑性至关重要^[11],不合理的阻尼系数可能会导致系统响应迟钝或振荡,从而影响系统的稳定性,因此本文的模糊控制器变量选择阻尼系数变化量作为模糊输出量。

根据气囊抛光工艺经验,本文设定接触力误差和接触力误差率作为输入变量^[12],接触力误差 e_d 的论域范围为 $-5 \sim 5$ N、接触力误差变化率 e_e 的论域范围为 $-10 \sim 10$ N/s,设定输出变量阻尼系数变化量 Δ_b 的论域范围为 $-30 \sim 30$,将上述 3 个论域范围分别划分为 7 个模糊集合,分别用模糊语言进行标识,按照三角形隶属度与模糊集合——对应划分为:PB(positive big)代表正大、PM(positive medium)代表正中、PS(positive small)代表正小、Z(zero)代表零、NS(negative small)代表负小、NM(negative medium)代表负中、NB(negative big)代表负大。 Δ_b 的模糊控制规则^[11]如表 1 所示。

此外,本文采用自适应扰动补偿控制(active disturbance rejection control, ADRC)中的微分跟踪器(tracking differentiator, TD)来实现期望力的缓慢释放^[13],其数学表达形式如下:

表 1 Δ_b 的模糊规则表

Tab.1 Fuzzy rule table of Δ_b

e_d	e_c						
	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
NB	PB	PM	PS	Z	Z	Z	Z
NM	PB	PM	PS	Z	Z	Z	NS
NS	PB	PS	PS	Z	Z	NS	NM
Z	PB	PS	PS	Z	NS	NB	NB
PS	PM	PS	Z	Z	NS	NM	NB
PM	PS	Z	Z	Z	NS	NM	NB
PB	Z	Z	Z	Z	NS	NM	NB

$$f_0 = fhan(v_1(t) - F_d, v_2(t), r_0, h) \quad (3)$$

$$v_1(t+1) = v_1(t) + hv_2(t)$$

$$v_2(t+1) = v_2(t) + hf_0$$

式中： $fhan(\cdot)$ 表示 ADRC 的跟踪微分控制器的核心函数； F_d 为期望力； v_1 、 v_2 分别为设定力和设定力的微分； h 为控制周期（即采样步长）； r_0 为调整参数，用于表征控制系统中调节过渡过程的时长，其大小与过渡时间成反比。

2 机器人气囊抛光恒力控制系统仿真分析

在 SIMULINK 仿真软件中搭建机器人气囊抛光恒力控制模型，设定期望力为 20 N，1 s 后引入外力 40 N，以验证该模型受到外力影响后的快速恢复能力，依次建立图 4 所示的仿真模型，经过仿真参数的调节优化，最终的接触力仿真效果如图 5 所示。

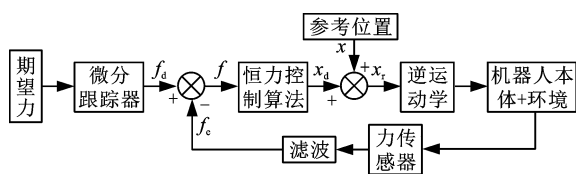


图 4 机器人气囊抛光恒力控制框图

Fig.4 Robot bonnet polishing constant force control block diagram

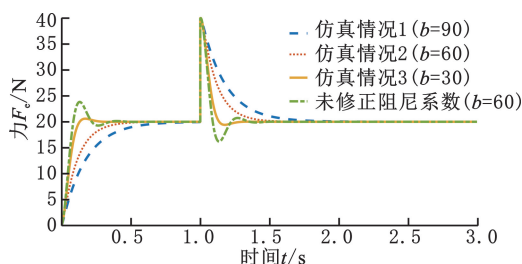


图 5 接触力仿真变化曲线

Fig.5 Contact force simulation curve

通过实验测定后分别设定质量系数 $m = 3$ 、弹度系数 $k = 100$ 。由于模糊控制输出的阻尼系数变化量论域范围为 $-30 \sim 30$ ，因此可按照 $\Delta b = 30$ 改变阻尼系数 b ，分别选择 b 为 30、60、90 进行接触力仿真，为验证未修正阻尼系数时的接触力变化情况，引入恒定阻尼系数 $b = 60$ 进行仿真，如图 5 所示。在初始阶段（约 $0 \sim 1$ s 内），由于微分

跟踪器的影响，控制系统在初期接收到的期望力被缓慢释放；在外力引入阶段（第 1 s 时激发），接触力由于受到外力的影响瞬间上升至峰值，而后激发恒力控制系统重新调节阻尼参数，以期快速恢复至期望力数值，若未及时修正阻尼系数，接触力在前期则会出现明显振荡；在稳态阶段（约 2 s 后），接触力数值持续稳定在期望力处，系统在控制器的调节下达到了动态平衡状态。由图 5 可以看出，相较于其他情况，当阻尼系数 $b = 60$ 、 $\Delta b = 30$ 时可以呈现出较好的接触力收敛情况，不会出现超调或响应速度过慢的情况，由此表明该控制系统可通过优化阻尼系数来实现接触力的快速收敛。

3 实验验证

3.1 平面光学元件抛光实验

本文使用光学元件材质为 JGS2 且规格为 $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 的平面光学元件分别开展定点抛光实验和整面抛光实验，定点抛光是指保持气囊工具头进动角不变的情况下采用 4 个不同的姿态位置角进行同一个点位抛光，4 个抛光位置姿态分别如图 6 所示，对比有无恒力控制下的抛光力变化情况、去除深度和抛光斑质量等因素。抛光实验参数如表 2 所示，平面光学元件定点抛光力数据和整面抛光力数据如图 7 和图 8 所示，定点抛光后的抛光斑拍摄数据如图 9 所示，实验统计结果如表 3 所示。

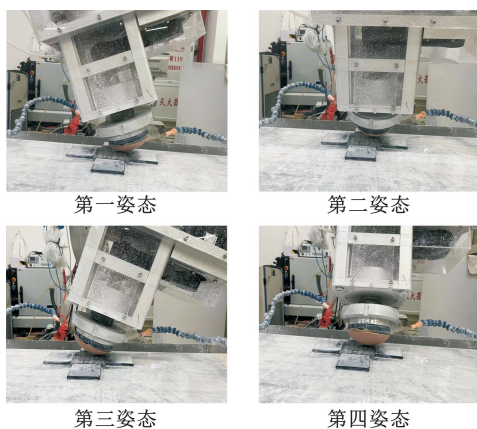


图 6 机器人定点抛光图

Fig.6 Robot spot polishing picture

表 2 抛光实验参数

Tab.2 Polishing experimental parameters

进动角/ (°)	主轴转速/ ($r \cdot \text{min}^{-1}$)	充气压力/ MPa	驻留 时间/s	抛光液
23	500	0.2	6	质量分数为 5% 的氧化锆溶液

通过对比图 7 和图 8 可以看出，开启恒力控制后，气囊工具头的接触力误差显著减小。在图

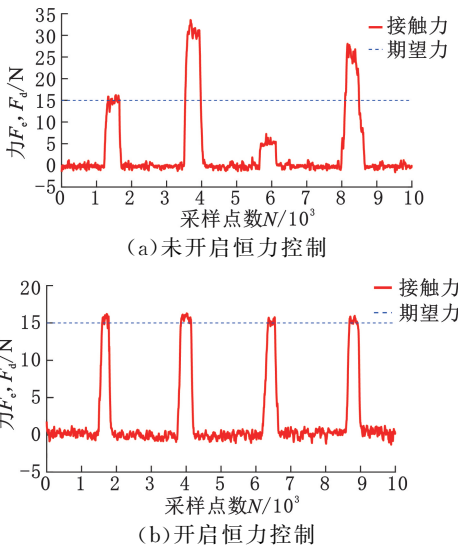


图 7 平面光学元件定点抛光力数据

Fig.7 Planar optical element fixed point polishing force data

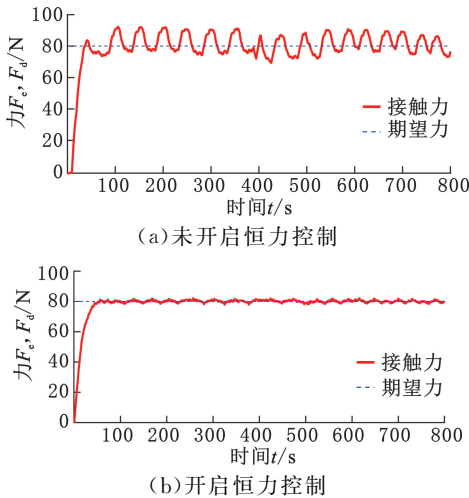


图 8 平面光学元件整面抛光力数据

Fig.8 Planar optical element surface polishing force data

9 所示的抛光斑拍摄数据中,对于未开恒力控制的抛光斑,其抛光斑形状并不规则且呈现出椭圆形,而开启恒力控制的抛光斑形状近似圆形,去除均匀性较好,确保了平面光学元件在抛光区域内的去除深度一致性。

3.2 曲面光学元件抛光实验

气囊抛光在曲面工件中同样被广泛应用,选择 120 mm×40 mm 规格的曲面激光雷达罩进行抛光实验,采用计算面形误差 PV 收敛比进行表征,即将完整修形抛光一次后的整面面形误差 PV 值与原始面形误差 PV 值相除,PV 收敛比越大表明去除效率越高,抛光效果越好。抛光实验统计结果如表 4 所示。

无恒力控制时的接触力波动范围较大,这是因为气囊工具头与加工工件接触为纯刚性,微小

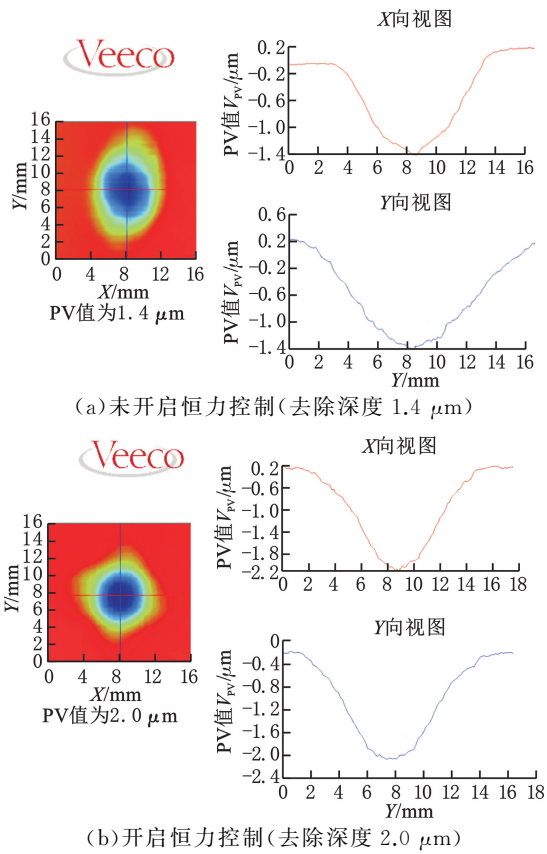


图 9 抛光斑拍摄数据

Fig.9 Polishing spot shot data

表 3 平面光学元件抛光实验统计结果

Tab.3 Statistical results of polishing experiments of planar optical element

	平面光学元件定点 抛光实验		平面光学元件整面 抛光实验	
	未开启	开启	未开启	开启
期望力/N	15	15	80	80
接触力误差/N	25	2	15	3
去除深度/μm	1.4	2.0	3.0	3.5

表 4 曲面激光雷达罩实验统计结果

Tab.4 Statistical results of polishing experiments of curved lidar optical element

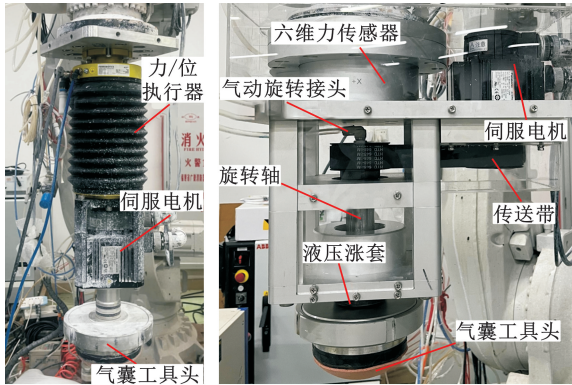
	未开启恒力控制	开启恒力控制
期望力/N	80	80
接触力误差/N	30	3
PV 收敛比	0.73	0.85

的对刀误差就会导致较大的力变化,因而其接触力波动范围在 0~30 N;开启恒力控制后的机器人需实时修正其位置姿态以实现接触力恒定,因此其接触力波动范围较小,且其 PV 收敛比较大。由此可知,本文所搭建的机器人气囊抛光恒力控制装置针对曲面工件同样具有较高的抛光效率,有效地改善了机器人因刚度变化而导致的接触力不稳定现象。

3.3 力/位执行器对比抛光实验

本次对比抛光实验使用的力/位执行器为

FerRobotics 公司的 ACF-121 系列,该型号的力/位执行器最高可负载 500 N 重物,补偿行程为 480 mm,其原理是通过闭环控制使得末端工具头跟随工件表面的变化而伸缩,最终达到与工件表面的接触力恒定。两种抛光装置实物图见图 10。实验选取的加工工件规格为 110 mm×110 mm 的 JGS2 平面光学元件。采用振动传感器监测抛光过程中的接触力振动位移幅值,传感器坐标系 X 轴方向与机器人基坐标系 X 轴方向重合,实验工件下方安装 S2M 力传感器监测接触力波动情况。分别使用力/位执行器和自主研发的恒力控制装置进行均匀抛光,设定恒力控制的期望力为 $F_c = 100\text{ N}$,由于气囊抛光存在 23° 进动角,因此作用在 S2M 力传感器上的期望力数值应为 $F_c \cos 23^\circ$ (即 92 N)。对比抛光实验统计结果如表 5 所示。



(a)力/位执行器 实物 (b)自主研发的恒力控制装置实物

图 10 对比抛光实验装置

Fig.10 Compare the polishing experimental device diagram

表 5 对比抛光实验统计结果

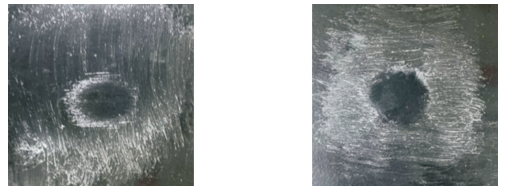
Tab.5 Comparison of statistical results of polishing experiments

		力/位执行器	自主研发的恒力控制装置
接触力振动/位移幅值/mm	X 方向	±0.015	±0.002
	Y 方向	±0.045	±0.001
	Z 方向	±0.005	±0.005
接触力波动/N		±1.2	±1.5
去除深度/ μm		3.2	3.1

由于力/位执行器通过伸缩补偿完成恒力控制过程,导致整个抛光装置的整体长度较大,因此其刚度水平较差,抛光时接触力振动位移幅值偏大;而对于自主研发的恒力控制装置,其补偿原理为通过改变机器人位置姿态来实现,因此具有较高的稳定性。对比两种恒力控制装置的抛光去除深度并无太大差异,这是因为两者的接触力波动

均在较小范围内,对去除深度的影响情况并不大。

此外,力/位执行器会在补偿接触力误差时导致气囊工具头在平面工件上产生滑移,使得抛光工件表面质量不均匀。为表征该现象,现将平面光学元件表面均匀涂抹凡士林,分别使用两种不同的恒力控制装置将气囊工件头以 20 r/min 转速与工件进行 100 N 的定力接触,平面光学元件表面留下的接触斑如图 11 所示,力/位执行器须沿着 23° 进动角滑移以实现恒力控制,而自主研发的恒力控制装置在工件表面法线方向上调节气囊工具头的高度,从而避免了气囊工具头的滑移现象产生。



(a)力/位执行器接触斑 (b)自主研发的恒力控制装置接触斑

图 11 接触斑对比

Fig.11 Comparison of contact spots

将两种恒力控制装置的各项优劣性能进行对比,如表 6 所示,本课题自主研发的恒力控制装置的刚度性能较好且调节气囊工具头位置时不会出现接触斑滑移现象,因此本课题自主研发的恒力控制装置可以满足气囊抛光的技术要求。

表 6 两种恒力控制装置优劣对比

Tab.6 Comparison of two constant force control devices

	优势	劣势
力/位执行器	①恒力控制精度高; ②即插即用、通用性强。	①位移补偿距离恒定; ②特殊加工环境需定制; ③气体洁净度要求高; ④造价成本高。
自主研发恒力控制装置	①力值、位移补偿范围无限制; ②刚度强、稳定性高; ③适用于存在进动角的加工领域。	①力补偿精度与机器人运动精度有关; ②不同加工环境须调试不同参数。

4 结论

1)完成机器人气囊抛光恒力控制系统设计。基于气囊抛光工艺特性搭建全面集成的机器人气囊抛光恒力控制系统,其中包括机器人本体单元、气囊抛光工具单元、外部辅助单元。

2)开发机器人气囊抛光恒力控制算法。提出模糊阻抗控制算法,并根据气囊抛光工艺流程设计恒力控制过渡方案,搭建机器人气囊抛光恒力控制仿真系统,仿真结果表明可通过变阻尼系数

实时修正机器人位置姿态,实现抛光接触力恒定控制。

3)使用自主研发的恒力控制装置开展气囊抛光恒力工艺实验。分别开展平面光学元件和曲面光学元件抛光实验,将商品化力/位执行器与自主研发的恒力控制装置进行对比抛光实验,综合分析各自优劣势。实验结果表明本文自主研发的恒力控制装置可将力波动范围控制在3 N以内,在机器人气囊抛光领域有较好的适用性和较高的性价比。

参考文献:

- [1] 郭万金, 赵伍端, 利乾辉, 等. 基于集成概率模型的变阻抗机器人打磨力控制[J]. 浙江大学学报(工学版), 2023, 57(12):2356-2374.
GUO Wanjin, ZHAO Wurui, LI Qianhui, et al. Grinding Force Control of Variable Impedance Robot Based on Integrated Probability Model[J]. Journal of Zhejiang University(Engineering), 2023, 57(12):2356-2374.
- [2] 王春锦. 大口径光学元件的半柔性气囊高效抛光技术研究[D]. 厦门:厦门大学, 2015.
WANG Chunjin. Research on High-efficiency Polishing Technology of Semi-flexible Bonnet for Large Aperture Optical Components[D]. Xiamen: Xiamen University, 2015.
- [3] BINGHAM R G, WALKER D D, KIM D H, et al. Novel Automated Process for Aspheric Surfaces; Proceedings of the Current Developments in Lens Design and Optical Systems Engineering[C]//International Symposium on Optical Science and Technology. San Diego, 2000:445-450
- [4] WALKER D, FREEMAN R, HOBBS G, et al. Zeeko 1 Metre Polishing System[C]//Proceedings of the 7th International Conference. Cranfield, 2005:240.
- [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. Large Aperture Aspherical Element Controlled Air Bag Polishing System[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2012, 24(6):1344-1348.
- [6] 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. A New Technique for Polishing Bonnet Tools[J]. Optical Technique, 2004, 30(3):333-336.
- [7] KIM D W, KIM S W. Static Tool Influence Function for Fabrication Simulation of Hexagonal Mirror Segments for Extremely Large Telescopes[J]. Optics Express, 2005, 13(3):910-917.
- [8] HOGAN N. Impedance Control: an Approach to Manipulation: Part II—Implementation[J]. Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 1985, 107(1):8-16.
- [9] 李正义. 机器人与环境间力/位置控制技术研究与应用[D]. 武汉:华中科技大学, 2011.
LI Zhengyi. Research and Application of Force/Position Control Technology between Robot and Environment[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2011.
- [10] LIANG B, ZHENG S, AHN C K, et al. Adaptive Fuzzy Control for Fractional-order Interconnected Systems with Unknown Control Directions [J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2020, 30(1):75-87.
- [11] 陈满意, 朱自文, 朱义虎, 等. 曲面抛光机器人的模糊自适应阻抗控制[J]. 计算机集成制造系统, 2024, 30(6):2090-2099.
CHEN Manyi, ZHU Ziwen, ZHU Yihu, et al. Fuzzy Adaptive Impedance Control of Surface Polishing Robot[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2024, 30(6):2090-2099.
- [12] 杜华鹏. 基于力/位控制的钛合金零件自动抛光技术研究[D]. 大连:大连理工大学, 2015.
DU Huapeng. Research on Automatic Polishing Technology of Titanium Alloy Parts Based on Force/Position Control[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2015.
- [13] 张文华. 航发叶片打磨机器人时间最优轨迹规划及恒力控制研究[D]. 天津:河北工业大学, 2023.
ZHANG Wenhua. Research on Time Optimal Trajectory Planning and Constant Force Control of Aerofoil Blade Grinding Robot[D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2023.

(编辑 胡佳慧)

作者简介:李路骋,男,1999年生,硕士研究生。研究方向为机器人气囊抛光应用技术。E-mail:1027035847@qq.com。王振忠*(通信作者),男,1981年生,教授、博士研究生导师。研究方向为超精密加工技术、激光与增材制造、机器人集成应用技术。E-mail:wangzhenzhong@xmu.edu.cn。

本文引用格式:

李路骋,王振忠,黄雪鹏.基于模糊阻抗控制的机器人气囊抛光恒力控制系统研究[J]. 中国机械工程,2025,36(5):1028-1034.
LI Lucheng, WANG Zhenzhong, HUANG Xuepeng. Research on Constant Force Control System of Robot Bonnet Polishing Based on Fuzzy Impedance Control[J]. China Mechanical Engineering, 2025, 36(5):1028-1034.