

文章编号: 1005-0523(2020)03-0110-07

气动式主动顺应去毛刺工具研究

槐创锋, 黄涛, 黄升, 尚鲁强

(华东交通大学机电与车辆工程学院, 江西南昌 330013)

摘要:设计了一种气动式主动顺应去毛刺工具,并进行建模仿真和实验对比分析。设计的工具在轴向和径向均主动可控,使用线性气动执行器来控制轴向力,并与测量轴向高度的线性编码器集成,通过与角度传感器集成的气动环形驱动器来进行径向力控制,两个顺应系统通过万向节结构实现混合控制。对工具进行动态建模和分析,根据超弹性理论采用 Arruda-Boyce 本构模型并基于施加在工具尖端上的力和因力作用而引起的位移来确定轴、径向刚度,通过 ANSYS Workbench 进行刚度模拟计算再由实验验证仿真结果,证明该去毛刺工具在作业过程中可以自由浮动,具有主动顺应性的同时还能根据轴向和径向上所受压力提供与之相适应的刚度,减小作业中的振颤与干扰,保证加工精度。

关键词:气动式;主动顺应;万向节;刚度模拟;超弹性理论

中图分类号:TH114 **文献标志码:**A

DOI:10.16749/j.cnki.jecjtu.2020.03.014

随着工业自动化进程的加快,目前多采用工业机器人代替传统手工去毛刺的作业方式来提高效益,降低成本,保障质量。但由于机器人进行作业时存在定位误差,采用刚性的切削工具容易出现刀具崩断和工件损坏的情况。一般来说,切削工具有硬和软两大类,前者用于切削,包括车削、铣削和钻孔,后者用于精加工,包括抛光和去毛刺。对于软工具其具有内在柔顺性,与人手相似,为精加工操作提供不同的刚度,可有效避免刀具和工件的损坏。目前有两种类型的柔顺工具,一是无控制的被动弹簧,即工具对接触力产生一定的自然顺从能力,称为被动顺从;二是带有控制的主动气动执行器,根据力-位传感器的反馈信息对接触力进行主动控制以保证力的稳定,称为主动顺从,随着机器人、传感器、控制技术的发展受到广泛研究。Sugita S 等^[1]介绍一种通过空气阻尼器的方式吸收多余能量来避免执行器出现振颤和破损;Cho C 等^[2]提出一种交叉孔去毛刺执行器,通过在旋转主轴上安装弹簧来吸收多余的力;Heule U H^[3]通过在工具到头尾部安装弹簧,使其在轴向具有浮动的特性;Kim 等^[4]阐述了空气的可压缩性会导致执行器的振颤,采用鲁棒反馈线性化控制方法来减少干扰;王宪伦等^[5]通过采用磁力缓冲器来实现执行器径向浮动;王磊等^[6]公开了一种机械手末端的去毛刺工具,该装置可以在径向移动也能在轴向移动,但刚度难以保证。

综上,主动柔顺去毛刺执行器的设计既要满足轴向、径向的自由浮动,也要保证具有一定的刚度使其在作业过程中减小振颤和干扰。提出一种主动柔顺抛光-去毛刺工具头设计,通过采用单作用气缸和环形气动执行器提供径向顺从力结合万向节结构实现轴向、径向的顺应控制并进行刚度仿真模拟和实验验证。

收稿日期:2019-10-08

基金项目:国家自然科学基金(51265011)

作者简介:槐创锋(1981—),男,副教授,博士,研究方向为机械设计及理论。

1 混合设计

由于毛刺几何形状通常是未知的,本文提出一种气动式主动顺应去毛刺工具设计,设计原理是工具尖端和零件之间是柔性接触^[7-8],图1所示为组合径向和轴向方向的工具混合模型。这是一种工具在 x, y 和 z 轴上具有三个刚度的三维模型,引入作用平面以将 x 和 y 轴结合到一个轴,即径向方向和 z 轴沿轴向方向。

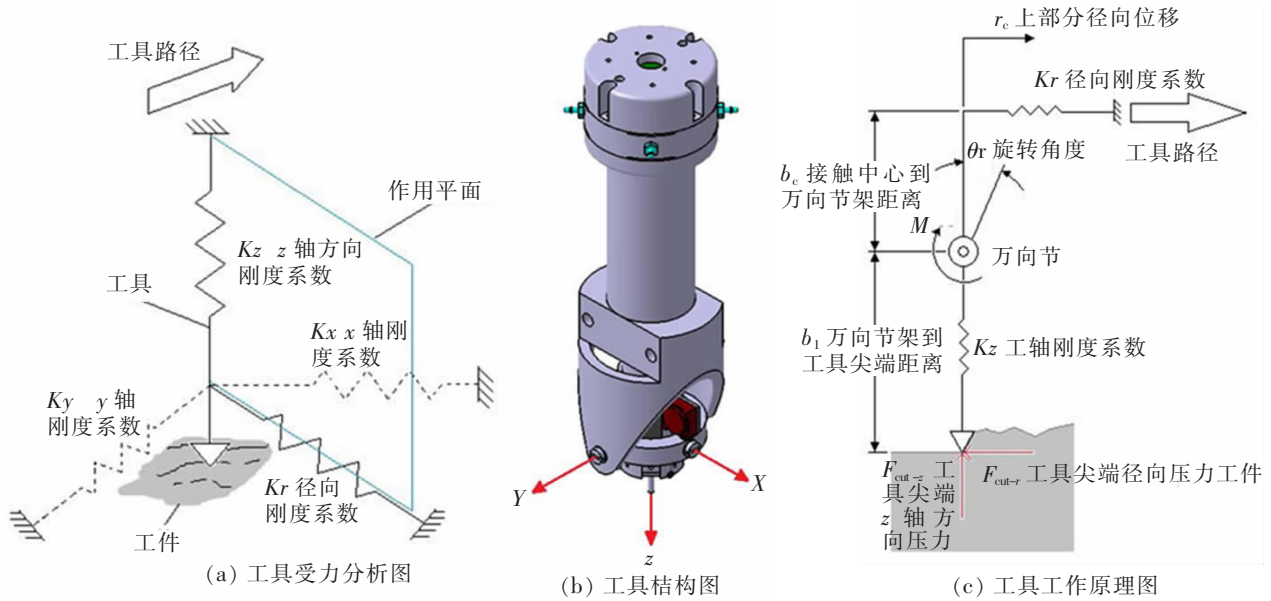


图1 主动顺应去毛刺工具设计模型
Fig.1 Design model of active compliance deburring tool

设计的工具必须在轴向和径向方向上主动可控。如图1所示,工具头的底部用于轴向顺应控制,使用线性气动执行器来控制轴向力,并与用于轴向高度测量的线性编码器集成,顶部通过与 $x-y$ 角度传感器集成的气动环形驱动器进行径向顺应控制,两个顺应系统通过万向接头连接^[9]。

2 工具动态建模

工具的两个运动轴为 x 轴和 y 轴,内部万向节旋转轴为 x 轴,外侧万向节轴 y 轴。 z 轴与工具的轴向方向一致,正方向为从万向节架到工具尖端。在径向方向上,刀具的 x 和 y 轴组合成径向作用平面,作用平面旋转方向平行于径向位移和力的方向。在工具的径向力作用期间,作用平面将在气动环形驱动器作用期间描述工具的全部运动范围。

该工具在径向具有两个位移, r_l 为下部分径向位移, r_u 为上部分径向位移。下部分的位移是工具轴的位移,这是由于碰到毛刺的直接结果。上部分的位移是由于工具尖端移动而导致的工具轴在传感器处的最终位移。该工具分为上半部和下半部分, b_1 为从万向节架到工具尖端的距离, b_u 为从工具轴和驱动器膜片接触中心到万向节架距离,4个变量之间的关系如式(1)所示

$$r_l = \frac{b_1}{b_u} r_u \tag{1}$$

上下径向移动的速度和加速度可以用式(1)的导数来表示

$$\dot{r}_l = \frac{b_1}{b_u} \dot{r}_u \quad \ddot{r}_l = \frac{b_1}{b_u} \ddot{r}_u \tag{2}$$

作用平面中的工具轴旋转角度 θ_r 可以通过对工具上、下两侧的部件求正弦得到,作小角度近似

$$\sin\theta_r = \frac{r_u}{b_u} \quad \theta_r = \frac{r_u}{b_u} \tag{3}$$

角速度和加速度可以用式(3)的导数表示

$$\dot{\theta}_i = \frac{\dot{r}_u}{b_u} \quad \ddot{\theta} = \frac{\ddot{r}_u}{b_u} \quad (4)$$

枢轴轴线的力矩总和 M 如下式

$$M = M_{RA} + M_{cut} \quad (5)$$

M_{RA} 是由径向驱动器引起的枢轴力矩, M_{cut} 是工具尖在零件上的切割力引起的枢轴力矩。式(6)进一步将 M_{RA} 分解成其相应部件径向驱动器的力 F_{RA} 乘以力臂 b_u 。径向驱动器的力 F_{RA} 可以进一步分解为径向驱动器刚度 K_{RA} 乘以行进的径向位移 r_u 。

$$M_{RA} = F_{RA} b_u \quad (6)$$

由于切削力的关系, 枢轴力矩 M_{cut} 与式(6)类似, 它们有不同的力臂, 因此

$$M_{cut} = F_{cut-r} b_l \quad (7)$$

将式(6)和式(7)代入式(5)并且以惯性重写 M 得到

$$\left(\frac{l}{b_l}\right) \ddot{r}_l + (K_{RA} \frac{b_u^2}{b_l^2}) r_l = F_{cut-r} \quad (8)$$

类似地, 工具的轴向建模是气动驱动器刚度与工具尖和零件刚度关系耦合。式(9)给出了工具运动轴向分量的质量与轴向刚度之间的动态关系

$$m_z \ddot{z} + K_z z = F_{cut-z} \quad (9)$$

这两个方程的组合产生了混合工具头的完整模型

$$\begin{bmatrix} \frac{l}{b_l} & 0 \\ 0 & m_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{r}_l \\ \ddot{z} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{RA} \frac{b_u^2}{b_l^2} & 0 \\ 0 & K_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_l \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{cut-r} \\ F_{cut-z} \end{bmatrix} \quad (10)$$

式中: 每个项都是去毛刺工具动态模型的重要组成部分。 F_{cut-r} 和 F_{cut-z} 通过赫兹接触力学的工具/零件相互作用来定义, K_z 定义为轴向刚度。如前所述, 轴向驱动器由线性气动执行器组成, 并且通过测量气缸力与其位移的比率, 该刚度相对容易被测定。 K_{RA} 是径向驱动器的刚度, 由于这是一个环形驱动器, 径向刚度相对较复杂。

3 工具径向刚度求解

3.1 气动环形驱动器建模

图2为气动环形驱动器模型, 其基座结构是一个均分为4个槽的圆环形结构, 每个槽的内侧由隔膜覆盖, 隔膜由弧形保持器夹紧以跟随圆形孔形。环形外壳的外侧, 顶部和底部都有密封。4个空气喷嘴用于将空气供应到4个空气室, 空气喷嘴可以在单个阀门或螺旋阀下进行控制。环形驱动器的刚度由这4个加压隔膜室决定。

为了提供径向顺应性, 驱动器在非加压隔膜和固定到双轴万向节架的工具轴外径中心之间有 3.175 mm 的间隙。当需要压力时, 隔膜和工具轴之间的间隙将被充气隔膜填满。作业时工具尖端将偏转, 这将导致工具轴在作用平面内的径向偏转。偏转将导致驱动器上因隔膜变形产生反作用力。工具轴的总变形是切割力和隔膜膨胀综合作用的结果。对于刚度建模, 采用超弹性材料理论。超弹性材料由本构模型定义, 该模型从应变能量密度函数导出应力-

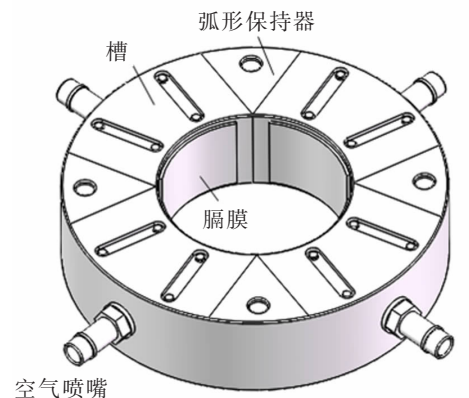


图2 气动环形驱动器

Fig.2 Pneumatic ring driver

应变关系。这里,采用 Arruda-Boyce 本构模型等^[10-12]

$$W_{Beh} = \frac{Nk_B T}{2} [\beta \lambda_{chain} + \sqrt{n} \ln(\frac{\beta}{\sinh \beta})] \tag{11}$$

$$\lambda_{chain} = \sqrt{\frac{I_1}{3}} \quad \beta = L^{-1}(\frac{\lambda_{chain}}{\sqrt{n_{chain}}}) \tag{12}$$

式中: n 是超弹性材料的链段数; I_1 是左 Cauchy-Green 变形张量的第一不变量; k_B 是玻尔兹曼常数; T 是温度; N 是交联聚合物网络中的链数。应变能密度公式可以用多项式表示为

$$W_{Beh} = \mu \sum_{i=1}^n [\frac{C_i}{\lambda_m^{2i-2}} (I_1^i - 3^i)] \tag{13}$$

材料的锁定拉伸由 λ_m 表示,初始剪切模量用 μ 表示,应变能密度可以用变形梯度表示。Langevin 函数用前三项的序列扩展形式表示

$$\bar{U} = \mu [\frac{1}{2} (\bar{I}_1 - 3) + \frac{1}{20 \beta^2} (\bar{I}_1^2 - 9) + \frac{11}{1050 \beta^4} (\bar{I}_1^3 - 27) + \dots] + \frac{K}{2} (J-1)^2 \tag{14}$$

因此,Arruda-Boyce 模型的应力-应变定律表示为

$$\sigma_{ij} = \frac{\mu}{J^{5/3}} (1 + \frac{I_1}{5J^{2/3}\beta^2} + \frac{33I_1^2}{525\beta^4 J^{4/3}} + \dots) + (\beta_{ij} - \frac{I_1}{5} \delta_{ij}) + K(J-1)\delta_{ij} \tag{15}$$

实际中取决于被建模的变形类型,式(15)中的主应力-应变关系可用于定义工程应力-应变关系,从中可以获得环形驱动器的刚度。

3.2 气动环形驱动器刚度模拟

由于式(15)难以求解力,这里使用有限元程序进行刚度模拟以确认刚度,假设工具轴是刚性的,并且所有的变形都发生在隔膜上。输入力 F_{cut-r} 由工具尖切削所产生,该力通过万向节轴 F_{RA} 传递到执行机构。为简单起见,只有一个槽被建模,它代表整个环形驱动器的四分之一。如图 3(a)所示,从工具到隔膜的压力被施加到工具轴圆柱体的平面上,而来自隔膜背面的压力被施加到与圆柱体的接触相反的自由表面。对于非线性超弹性材料,使用大偏转进行分析,使用 ANSYSWorkbench 中的静态结构分析函数解决模型的总体。考虑相对于轴实际中心位置的隔膜变形 d_s ,以确定中心位置到轴的位移 r_u ,图 3(b)为 d_s 和 r_u 之间的关系图。

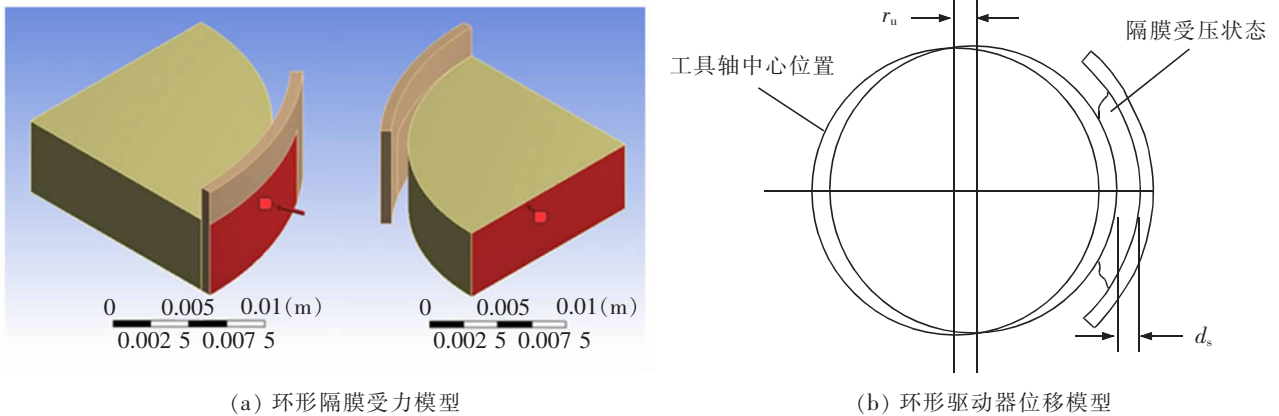


图 3 环形驱动器刚度建模
Fig.3 Stiffness model of ring driver

图 4 为 1 N 的轴力和 200 Mpa 的隔膜压力产生变形的模拟结果,根据施加的力和压力,模拟的隔膜变形 d_s 可能会超过间隙,发生这种情况,实际的间隙值被认为是最大的轴位移。

为了确定环形驱动器的刚度,隔膜上的压力和轴上的压力在设计要求上是可变的,工具尖上的力在 5.50~16.49 N 之间变化,压力在 100~400 MPa 之间变化。从中心位置到工具轴的径向位移可以通过隔膜总径向距离减去 d_0 和工具轴径向厚度来计算。根据工具轴上的力,使用得到的位移来确定环形驱动器的刚度,基于工具轴的力,根据相对压力关系绘制刚度值,如图 5 所示。

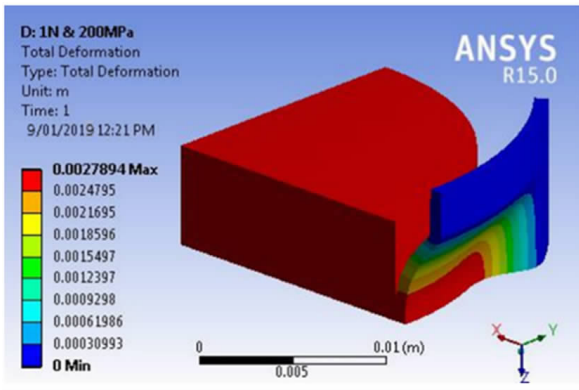


图 4 环形驱动器变形模拟

Fig.4 Deformation simulation of ring driver

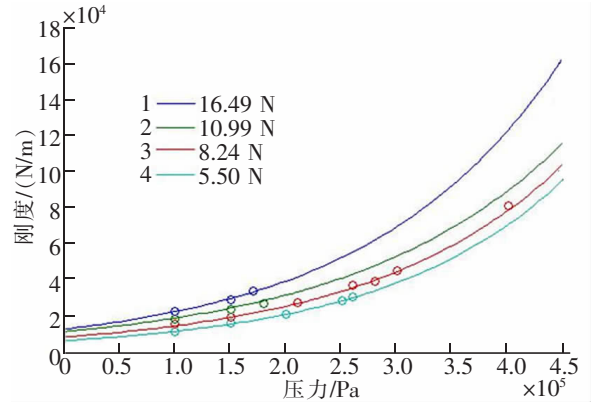


图 5 环形驱动器模拟刚度曲线

Fig.5 Simulation stiffness curve of ring driver

来自图中的数据通过式(16)拟合到表 1 中不同切削力系数的指数函数

$$y = a_{exp} a^{b_{exp} x} \tag{16}$$

表 1 刚度和压力关系系数

Tab.1 Relationship between stiffness and pressure

切削力/N	a_{exp}	$b_{exp} / 10^{-6}$
5.50	6 095	6.12
8.24	8 088	5.68
10.99	11 030	5.23
16.49	12 490	5.72

4 气动环形驱动器刚度实验

实验中,使用两个微米级的双轴平台来精确测量两个自由度的位移。工具端通过紧密公差将球关节固定到工作台上,工具尖的轴可自由滑动到该接头上,最终的校准是用适配器板将每个组件连接到通用固定刚性测试平台。在双轴平台上手动完成微米级校准,结合带有两个磁场传感器的定制板,并通过数据采集单元收集数据,每秒采样 100 次。对于每个传感器,使用可拆卸的塑料套环来确定偏置,该可拆卸的塑料套环装配在工具的内轴和外壳之间,套环将工具轴直接保持在中心位置以确定偏置。一旦轴中心和偏置确定,则可以向下滑动套环并将其移除。

使用信号滤波器用来降低信号内的噪声,校准数据是来自测量值和数据采集单元记录信号的组合。为了尽可能简单地记录和处理数据,使用脉冲发生器准确记录 x 和 y 传感器的每一个电压值,设置好时间参数,通过校准,使每个传感器保持线性关系。图 6 所示为电压与位移的关系曲线,式(17)是通过数据拟合获得的两个线性方程。为了验证电压和位移关系的精度,磁场传感器在工具周围 360° 通过 22.5° 增量进行校准,保持较小的时间增量,以创建清晰的位移和压力数据集,连续记录数据,并进行排序以获得稳定的压力值和位移值。

$$x=5.922V_{x\text{Sensor}}+5.068 \quad y=-5.912 \ 9V_{y\text{Sensor}}+5.037 \ 7 \quad (17)$$

校准后,通过对工具尖端施加载荷和改变环形驱动器的压力来测试工具的刚度,实验刚度和压力关系如图7所示。

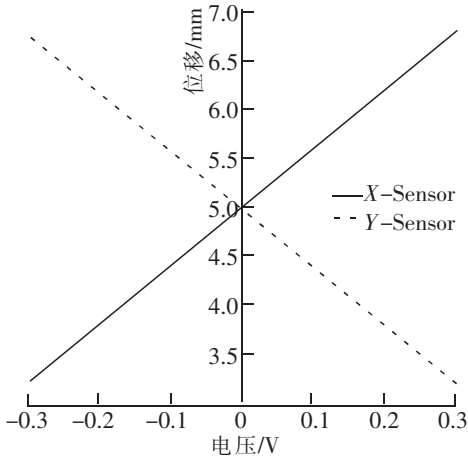


图6 电压-位移关系

Fig.6 Voltage-displacement relationship

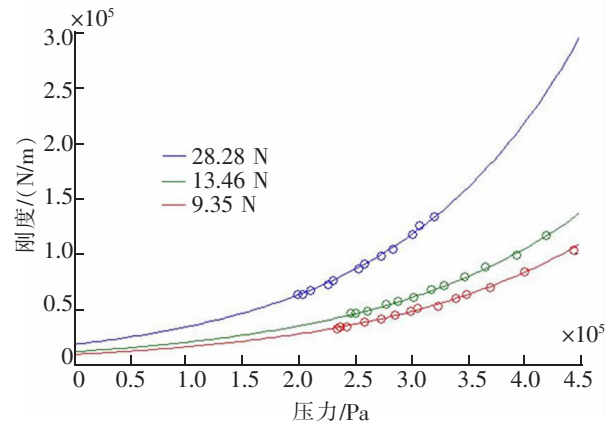


图7 实验刚度和压力测试结果

Fig.7 Test results of experimental stiffness and pressure

5 结论

本文提出一种气动式主动顺应去毛刺工具设计,可以在作业过程中保持轴向与径向的自由浮动,通过对工具进行混合设计、动态建模、刚度模拟以及实验验证得出如下结论:

1) 使用与线性编码器集成的线性气动执行器来控制轴向力,通过与角度传感器集成的气动环形驱动器来控制径向力,两个顺应系统通过万向节结构实现混合控制,能够为工具提供轴向与径向上的主动顺应性。

2) 基于施加在工具尖端上的力和由于受力作用而引起的位移来确定轴、径向刚度。在工具尖端力作用下,压力是变化的,所以观察到显著的位移变化以及相应的刚度,轴向刚度可以通过测量气缸力与其位移的比率来测定,径向刚度通过采用 Arruda-Boyce 本构模型定义工程应力-应变关系来获得。

3) 通过仿真模拟和实验对比,实验数据曲线拟合和模拟结果一样,它们都与指数函数相关,即去毛刺工具在作业过程中能提供与其所受压力相适应的刚度,在实现主动顺应性的同时减小振颤,保证精度。

参考文献:

- [1] SUGITA S, TAKEUCHI Y. Automation of casting products finishing works by a robot development of a hammering tool and its compensation function[J]. The international Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2004, 23(9-10): 98-105.
- [2] CHANG HEE CHO, KWON HEE KIM. Design of a deburring tool for intersecting holes in aluminum alloys[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2012, 212(5): 1132-1138.
- [3] HEULE U H. Deburring tool for deburring the edges of boreholes[P]. US: US5803679, 2008.
- [4] KIM C, CHUNG J H. Robust coordination control of a pneumatic deburring tool[J]. Journal of Robotic Systems, 2012, 22(S1): S1-S13.
- [5] 王宪伦, 崔玉霞, 王道全. 轴向缓冲机械去毛刺装置[P]. CN: CN104723213A, 2015.
- [6] 王磊, 姜兆明. 一种智能去毛刺机[P]. CN: CN202398898U, 2012.
- [7] 李科迪. 机器人去毛刺浮动式执行器设计与分析[D]. 杭州: 浙江大学, 2016.
- [8] 梁世盛, 魏晓阳. 基于气缸的主动恒力输出装置[J]. 光学精密工程, 2018, 26(3): 640-646.

- [9] 闵德瑞,赵云,黄凤立. 球笼式等速万向节轻量化优化设计[J]. 机械设计与制造,2014(7):136-138.
- [10] ARRUDA E M,BOYCE M C. A three dimensional constitutive model for the large stretch behavior of rubber elastic materials[J]. Journal of The Mechanics and Physics of Solids,1993,41(2):389-412.
- [11] BISCHOFF J E,ARRUDA E M. A new constitute model for the compressibility of elastomers at finite deformations[J]. Rubber Chemistry and Technology,2001,74(3):541-559.
- [12] 张菊辉,陈杨. 高阻尼橡胶支座的本构模型研究综述[J]. 弹性体,2016,26(5):82-88.

Research on Pneumatic Active Compliance Deburring Tool

Huai Chuangfeng, Huang Tao, Huang Sheng, Shang Luqiang

(School of Mechatronics and Vehicle Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: In this paper, a pneumatic active accompaniment deburring tool design is proposed, and the modeling simulation and experimental comparison analysis is carried out. The designed tool is actively controllable in both axial and radial direction. Linear pneumatic actuators are used to control axial forces and integrated with linear encoders to measure the axial height. The radial force control is achieved by pneumatic ring driver integrated with angle sensor and two compliant systems realize hybrid control through a universal joint structure. The dynamic modeling and analysis of the tool are carried out and the Arruda-Boyce constitutive model is adopted according to the hyperelasticity theory. The axial and radial stiffness are determined based on the force exerted on the tool tip and the displacement caused by the force. The stiffness simulation is performed by ANSYS Workbench and the simulation results are verified by experiments. It is proved that the deburring tool can float freely during operation, has active compliance, and can also provide the corresponding stiffness according to the pressure in the axial and radial directions that can reduce the vibration and interference in the operation and ensure the machining accuracy.

Key words: pneumatic; active compliance; universal joint; stiffness simulation; hyperelasticity theory