

仿腕关节柔顺并联打磨机器人设计与试验

朱伟^{1,2} 汪源¹ 沈惠平¹ 邓嘉鸣¹ 许兆棠²

(1. 常州大学机械工程学院, 常州 213016; 2. 江苏省数字化制造技术重点实验室, 淮阴 223003)

摘要: 根据柔性并联机构逆向自适应运动原理,设计了一种3转动输出的3SPS+S仿腕关节柔性并联打磨机构,建立了机构运动方程,得到了柔性支链变形量与动平台姿态的关系;分析了柔性支链的变形力以及打磨工具打磨力、输出力矩情况,并建立力学模型;以打磨工具姿态变化和打磨力恒定为目标,对建立的三维模型进行仿真,并通过样机模拟得到机构的工作参数范围;仿真和试验结果表明,这种打磨机构可根据工件曲面几何形状的改变而实时改变打磨工具姿态,在有效控制力的前提下可保持打磨头和工件间的接触打磨力不变,该机构设计简单、运动灵活、方便控制,具有较好的应用价值。

关键词: 打磨机器人; 腕关节; 柔顺并联机构

中图分类号: TH112 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)02-0402-06

Design and Experiment of Compliant Parallel Humanoid Wrist Joint Polishing Robot

Zhu Wei^{1,2} Wang Yuan¹ Shen Huiping¹ Deng Jiaming¹ Xu Zhaotang²

(1. School of Mechanical Engineering, Changzhou University, Changzhou 213016, China

2. Jiangsu Digital Manufacture Technology Main Lab, Huaiyin 223003, China)

Abstract: In the polishing process of free surface, the traditional intelligent control robot has some problems such as complex programming complexity and difficulty in controlling. A humanoid wrist joint compliant parallel mechanism 3SPS+S used in polishing robot was designed according to the principle of inverse adaptive motion of flexible, and its moving platform can output three rotations. Firstly, the inverse motion equation of the mechanism was established to obtain the relation between deformation quantity of the three flexible branched chains and attitude of the moving platform. Secondly, the mechanics model was deduced through analyzing deformation forces of flexible chains, grinding force and output moment of the tool. Furthermore, simulation was executed based on the 3D model for the target of the tool posture change and the constant grinding force, and the ranges of some work parameters were obtained through the prototype test. Lastly, taking a car shell as a grinding object, an experiment was designed to validate whether the grinding tool mounted on the moving platform could fit rapidly to the shell surface when humanoid wrist joint compliant parallel mechanism wholly moved along a given simple track under driving of a 6-DOF manipulator. Both simulation and test results showed that the position and attitude of the tool can be changed rapidly as changing the geometry of the workpiece through using the grinding mechanism, and it can keep the contact force unchanged between the grinding head and the workpiece. Because of several advantages, such as simple design, flexible movement and convenient control, this kind of mechanism previously has good application value.

Key words: grinding robot; humanoid wrist joint; compliant parallel mechanism

收稿日期: 2015-06-30 修回日期: 2015-08-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(51075045)、常州市科技支撑计划(工业)项目(CE20110080)和江苏省数字化制造技术重点实验室项目(HJDML-1001)

作者简介: 朱伟(1976—),男,副教授,博士,主要从事机器人机构学和多维振动控制研究,E-mail: zwwlx@126.com

引言

在自由曲面加工过程中,打磨、抛光、去毛刺等工作任务需要保持加工工具与工件直接接触,接触力大小取决于切削深度、加工速度以及材料属性等因素,同时需要根据曲面的几何形状实时调整加工工具的工作姿态,使其与曲面接触点的法线方向保持一致^[1-2]。对于传统的主动力控制机器人系统^[3-5],通常需要根据各种位置传感器实时监测加工工具姿态,并反馈给机器人控制系统,再采用适当的控制算法保持加工工具的姿态及位置。尽管这类机械手结构简单、加工精度高,但控制程序复杂,难以适应大幅度复杂自由曲面的加工。

为了简化力传感、减小控制难度,文献[1]提出一种并联结构的被动式打磨机器人,可根据未知曲面的几何形状实时调整加工工具的运动位置和工作姿态,并保持接触力恒定,不需要复杂的控制程序;文献[6]在研究低功率自动研磨机器人过程中,使用了平行四边形机构来达到对工件表面被动自适应控制的目的。这类机构均采用刚性构件通过运动副联结,运动过程中的位置姿态受机构奇异位形的限制,灵活度和自适应程度均有所下降,同时复杂的机构造成较多的局部自由度及过约束力^[7],在工程中难以推广应用。

根据人类手腕的运动特征可知,腕关节具有 3 转动自由度,具有高度的灵活性和柔顺度^[8]。由于并联机构具有刚度大、精度高、承载能力强等优点,并联式腕关节机构得到广泛研究^[9-12]。本文结合柔顺机构^[13-15]和混联机构^[16-17]的特点,提出基于 6 自由度串联机器人和 3SPS+S 柔顺并联机构的混联打磨机器人机构,分析柔顺打磨机构的运动方程和力学模型,通过仿真和样机试验验证打磨机构可实现姿态自动调整,并保持打磨力恒定。

1 仿腕关节柔性打磨机构设计原理

仿腕关节打磨机器人柔性机构必须满足:①需保证安装于动平台中心的打磨工具中轴线与接触面法线方向保持一致。②沿抛光工具中轴线方向的工作力保持恒定。③抛光工具的转速保持恒定。设计原理如图 1 所示,图中联结法兰与 6 自由度串联机械手固定联结,当机械手带动打磨机构从位置 A 移动到位置 B 的过程中,在柔性支链作用下,下平台可根据工件表面几何形状实时调整姿态,使打磨头始终保持在工件表面法线方向上;在可控气缸作用下,可保持打磨头与工件表面之间相对稳定的接触力。

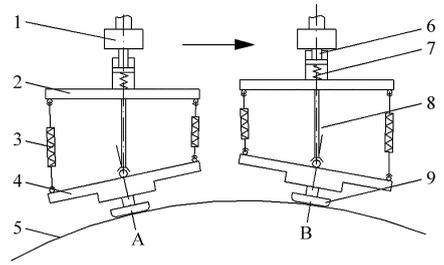


图 1 工作原理图

Fig. 1 Working principle diagram

1. 联结法兰 2. 上平台 3. 弹性支链 4. 下平台 5. 工件
6. 气缸 7. 弹簧 8. 中间支链 9. 打磨头

根据图 1 原理,采用 3SPS+S 柔顺并联机构设计仿腕关节打磨机构,如图 2 所示。机构由上平台 $\Delta B_1B_2B_3$ 、下平台 $\Delta A_1A_2A_3$ 、3 条柔性支链及可控气缸构成。柔性支链通过球副(S 副)与上、下平台联结于 B_i 和 A_i 点,中间支链 OO' 竖直固定联结于上平台中心 O' 点,并通过球副(S)与下平台联结于 O 点,法兰与上平台之间通过可控气缸联结。柔性支链可假想成一移动副(P),由于中间支链的约束,机构下平台在外力作用下可绕 O 点实现 3 自由度转动,上平台在气缸作用下可沿竖直方向移动,同时 6 自由度串联机械手联结于法兰上,带动打磨机构自由运动,可在较大工作空间范围内实现大幅度自由曲面的打磨抛光作业。

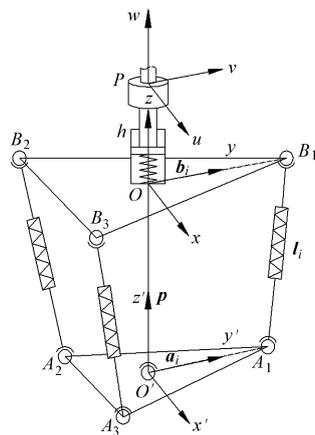


图 2 机构简图

Fig. 2 Mechanism diagram

2 机构运动分析

在图 2 中建立如下坐标系:分别在上平台和下平台中心建立中间坐标系 $Oxyz$ 和动坐标系 $O'x'y'z'$,使 y 轴指向 OB_1 方向, y' 轴指向 $O'A_1$ 方向; x 轴、 x' 轴分别在上平台 $\Delta A_1A_2A_3$ 和下平台 $\Delta B_1B_2B_3$ 平面内; z 轴、 z' 轴分别垂直于上、下平台;按照右手定理在联结法兰中心 P 点则建立打磨机构定坐标系 $Puvw$,由于法兰和 6 自由度串联机械手固定联结, P 点为打磨机构的参考点,位姿保持不变,因此中间坐标系

$Oxyz$ 可视作由定坐标系 $Puvw$ 向下平移 h 后得到, 三轴均互相平行; 图 2 中, \mathbf{p} 表示 $\overline{OO'}$ 的位姿矢量, \mathbf{l}_i 表示 $\overline{A_iB_i}$ (柔性支链) 的位置矢量, \mathbf{a}_i 、 \mathbf{b}_i 分别表示 $O'A_i$ 与 OB_i 的矢量, h 表示 \overline{OP} 的长度。

设上平台 $\triangle A_1A_2A_3$ 和下平台 $\triangle B_1B_2B_3$ 均为等边三角形, 中心点到顶点的距离分别为 r_b 和 r_a , 上平台中 B_i 点的位置矢量 \mathbf{b}_i 在坐标系 $Oxyz$ 中的位置可表达为

$$\begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & r_b & 0 \\ -\frac{\sqrt{3}r_b}{2} & -\frac{1}{2}r_b & 0 \\ \frac{\sqrt{3}r_b}{2} & -\frac{1}{2}r_b & 0 \end{bmatrix}^T$$

点 A_i 在动坐标 $O'x'y'z'$ 中的矢量 \mathbf{a}_i 可表示为

$$\begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & r_a & 0 \\ -\frac{\sqrt{3}r_a}{2} & -\frac{1}{2}r_a & 0 \\ \frac{\sqrt{3}r_a}{2} & -\frac{1}{2}r_a & 0 \end{bmatrix}^T$$

下平台相对于上平台的转换矩阵可表示为

$${}^B\mathbf{R}_A = \begin{bmatrix} c\beta c\gamma & -c\beta s\gamma & s\beta \\ s\alpha s\beta c\gamma + c\alpha s\gamma & c\alpha c\gamma - s\alpha s\beta s\gamma & -s\alpha c\beta \\ s\alpha s\gamma - c\alpha s\beta c\gamma & s\gamma c\alpha s\beta + s\alpha c\gamma & c\alpha c\beta \end{bmatrix}$$

式中 c, s —— \cos, \sin 函数

α, β, γ ——绕 x, y, z 轴的欧拉角

点 A_i 在中间坐标 $Oxyz$ 中的矢量, 可表示为

${}^B\mathbf{R}_A\mathbf{a}_i$, 点 A_i 和点 B_i 在定坐标系 $Puvw$ 中的矢量分别为 ${}^B\mathbf{R}_A\mathbf{a}_i + \mathbf{h}$ 和 $\mathbf{b}_i + \mathbf{h}$, 其中 $\mathbf{h} = [0 \ 0 \ h]^T$ 。

根据图 2 坐标系, 可得矢量位置关系

$$\mathbf{l}_i = \mathbf{p} + {}^B\mathbf{R}_A\mathbf{a}_i - \mathbf{b}_i \quad (1)$$

由此可得第 i 根柔性支链的单位矢量及长度的表达式为

$$\mathbf{e}_i = (\mathbf{p} + {}^B\mathbf{R}_A\mathbf{a}_i - \mathbf{b}_i) / l_i \quad (2)$$

$$l_i = \|\mathbf{p} + {}^B\mathbf{R}_A\mathbf{a}_i - \mathbf{b}_i\| \quad (3)$$

其中

$$l_i = l_{i0} + \Delta l_i$$

式中 $\|\cdot\|$ ——求模符号

\mathbf{e}_i, l_i ——第 i 根柔性支链的单位矢量和长度

l_{i0} ——初始位置时第 i 根支链的长度

Δl_i ——第 i 根弹性支链的长度变化量

由于 OO' 杆长和姿态均保持不变, 故矢量 \mathbf{p} 为常量。根据以上关系式, 容易求得各支链的长度 l_i 及长度变化量 Δl_i 。

3 受力分析

3.1 机构受力分析

由于中间支链的约束, 下平台只能输出 3 自由

度转动。在气缸压缩力 F_p 的作用下, 打磨工具与工件间的接触力会产生弯矩 \mathbf{M}_c (G 为接触点), 使下平台发生姿态变化, 从而使打磨工具的轴线保持在工件接触点的法线方向上。假设在打磨头上施加等效六维广义力矢量 (包含力和力矩), 如图 3 所示, 可描述为

$$\mathbf{F} = [\mathbf{F}_c \quad \mathbf{M}_c]^T = [F_{Gx} \quad F_{Gy} \quad F_{Gz} \quad M_{Gx} \quad M_{Gy} \quad M_{Gz}]^T \quad (4)$$

其中

$$M_{Gx} = tF_{Gx} \quad M_{Gy} = tF_{Gy}$$

式中

\mathbf{F}_c ——惯性力 \mathbf{M}_c ——惯性力矩

F_{Gz} ——沿打磨头的法向力, 为有效打磨力

M_{Gx}, M_{Gy} ——绕 x, y 轴的弯矩, 综合弯矩表达为 $\sqrt{M_{Gx}^2 + M_{Gy}^2}$, 可改变下平台姿态

M_{Gz} ——绕 z 轴的弯矩, 可通过打磨头自身旋转产生的扭矩抵消

t ——中间球副至打磨头接触点的长度

若忽略工具旋转的动力学影响, 根据图中受力关系可知

$$F_p = F_{Gz} \cos \theta \quad (5)$$

式中 θ ——下平台与中间支链的夹角

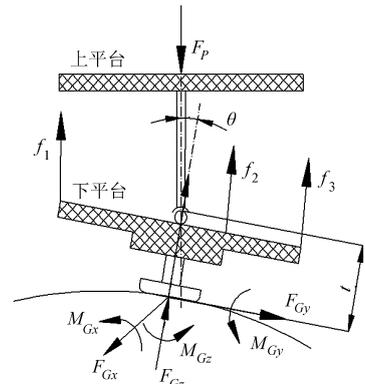


图 3 机构受力情况

Fig. 3 Force of mechanism

假设柔性支链的变形量与弹性力呈线性关系, 根据胡克定理, 支链弹性力为

$$\begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_1 & & \\ & k_2 & \\ & & k_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta l_1 \\ \Delta l_2 \\ \Delta l_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{e}_1 \\ \mathbf{e}_2 \\ \mathbf{e}_3 \end{bmatrix}^T \quad (6)$$

式中 k_i ——第 i 条弹性支链刚度

根据图 3 受力关系, 支链中的受力也可描述成类似的 6 维广义力形式, 即

$$\begin{cases} \mathbf{M}_c + \sum_{i=1}^3 \mathbf{r}_{ai} \times \mathbf{f}_i = 0 \\ \mathbf{F}_c + \mathbf{F}_p + \sum_{i=1}^3 \mathbf{f}_i = 0 \end{cases} \quad (7)$$

由于动静平台之间在中间支链的约束下, 没有

相对位移。式(7)可写成矩阵形式

$$\begin{bmatrix} \mathbf{F}_G \\ \mathbf{M}_G \end{bmatrix} = \mathbf{J}^T \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{e}_1 & \mathbf{e}_2 & \mathbf{e}_3 \\ \mathbf{r}_1 \times \mathbf{e}_1 & \mathbf{r}_2 \times \mathbf{e}_2 & \mathbf{r}_3 \times \mathbf{e}_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中 \mathbf{J} ——力雅可比矩阵

\mathbf{r}_i ——中间球铰至第 i 条柔性支链的距离(即力臂)

3.2 接触力模型

打磨工具与工件间的接触力是决定打磨质量和切削深度的关键,它是由气缸施加的伸缩力 F_p 决定的。当工件几何形状发生变化时,为了保持接触力不变,气缸伸缩力应进行相应调整,同时,工具与工件间的接触面积也会发生变化,从而影响二者之间的摩擦力矩及打磨工具的旋转速度。根据赫兹公式模型^[18-19],接触力(图3中的 F_{GZ})可表达为

$$F = \frac{9\pi E^2 (k') \Delta^2 P_m^2}{4k} \quad (9)$$

其中 $k = b/a$

式中 P_m ——平均接触应力

a, b ——接触椭圆面长轴和短轴(见文献[18])

$E(k'), \Delta$ ——关于 a 和 b 的函数

考虑气缸控制力模型,压力控制阀所需电压与接触力间的关系可表示为

$$P_m = \sqrt[3]{\frac{4kF}{9\pi E^2 (k') \Delta^2}} = \sqrt[3]{\frac{4kG_p V_p A_c}{9\pi E^2 (k') \Delta^2}} \quad (10)$$

式中 G_p ——增益 V_p ——压力控制阀电压

A_c ——气缸活塞面积

打磨工具选用霹雳豹 A2150 型气动角磨机,整体结构如图4所示,其输出力矩可表示为

$$T_R = \frac{\eta R_f q^2}{\omega_0} \quad (11)$$

式中 η ——打磨工具的机械效率

R_f ——打磨工具内部气流阻力

q ——气流速度

ω_0 ——工具期望转速

若忽略工具惯性,角磨机的输出力矩均转换为克服摩擦的力矩,而摩擦力矩是随着工件几何形状的变化而变化的。因此,如果工具转速保持恒定,根据式(10),气流速率会发生变化。为了便于控制,工具输出力矩可转换为气流阀的电压,即

$$T_R = \frac{\eta R_f q^2}{\omega} \quad (12)$$

其中 $q = G_q V_q$

式中 ω ——工具实际转速

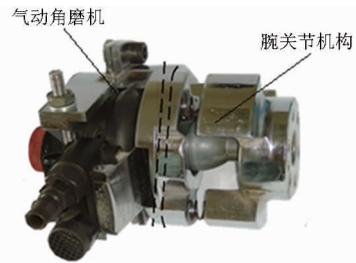


图4 打磨机构结构

Fig. 4 Structure of grinding mechanism

根据以上分析,仿腕关节打磨机构无需主动控制打磨头姿态,可由3条柔性支链自动调节,始终保持打磨头轴线与工件加工点的法线方向重合。为了保持打磨力及打磨速度的恒定,控制原理如图5所示。图中,输入电压 V_p 给压力控制阀,从而使气缸提供足够的空气压力,确保打磨工具与工件间的接触力恒定;输入电压 V_q 给流量控制阀,提供气流速率,确保角磨机的打磨速度恒定。具体控制方法本文不做讨论。

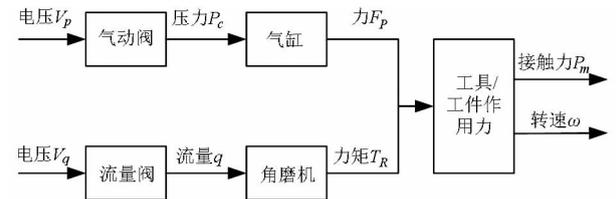


图5 工具控制原理

Fig. 5 Control principle of grinding tool

4 仿真与试验

在腕关节打磨机构实际样机制作中,为了简化机械结构,3条柔性支链采用弹簧替代,结构如图4所示。根据伪刚体模型等效法^[20],弹簧与动、静平台之间可近似看成通过球铰联结,相关参数如下:上下平台半径 $r_a = r_b = 45$ mm,上下平台距离 $p = 48$ mm,柔性支链等效刚度 $k_1 = k_2 = k_3 = 6.468$ N/mm,气缸内弹簧刚度 $k_q = 6.468$ N/mm,气缸行程 $h = 22$ mm,打磨面至下平台的距离 $t = 25$ mm,初始打磨压力 $F = 6.8$ N。

4.1 机构仿真

文中设计的仿腕关节打磨机构,在气缸的作用力下,打磨头表面与工件保持压紧状态,同时安装打磨头的下平台在3条柔性支链和中间球副作用下,随着工件几何形状的变化,其工作姿态随之发生变化,使打磨头姿态保持在工件接触点的法线上。如图3所示,打磨头的形状及尺度也是影响其姿态的重要因素,打磨面越大,所产生的弯矩越大,姿态也越容易改变。

为使打磨机构具有一般性,采用接触尺度较

小的半球形打磨头,在 ADAMS 环境中建立运动仿真模型,对较为复杂的三维面进行加工时,其姿态变化如图 6 所示。图中,设置气缸压力保持不变,工件固定,打磨机构在机械手带动下水平向右移动,随着工件形状发生变化,设计的打磨自适应机构无需复杂的运动轨迹和传感反馈,即可获得所需的运动姿态。

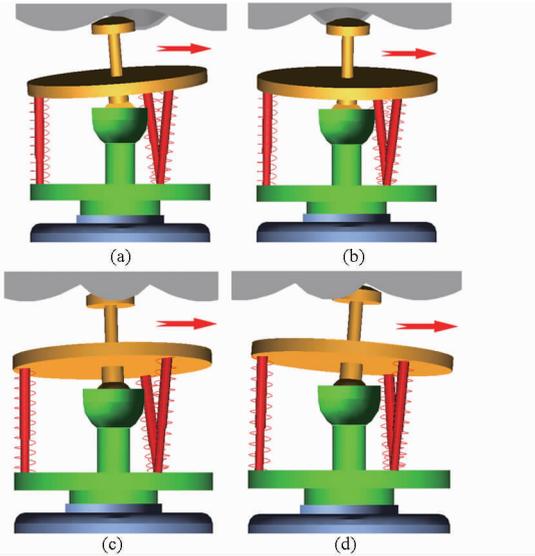


图 6 仿真过程

Fig. 6 Process of simulation

为了模拟打磨机构的运动姿态及力学特征,保证对自由曲面的打磨效果,工件曲面采用周期为 4、振幅为 2 mm、频率为 1/12 的正弦函数进行拟合,确保打磨头在工件凹凸点无死点工作,并设定气缸压力保持不变,打磨机构保持沿工件水平移动,3 条柔性支链的变形量如图 7 所示,受力变化如图 8 所示。图中,3 条柔性支链的变形量和受力变化基本符合胡克定理规律,在位移顶点处出现短暂的小幅振荡,是由于此处打磨头与工件接触力处于极限位置,其姿态不稳定,出现颤振现象。

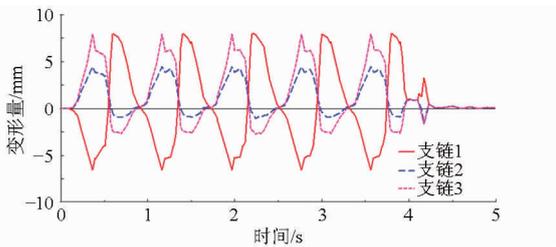


图 7 柔性支链的变形量曲线

Fig. 7 Deformation of three chains

气缸受力变化如图 9 所示,可见气缸压力基本随着工件几何形状的变化而变化。由于打磨作业时接触力难以测量,可根据式(5)反向求出打磨接触力。若使气缸作用力按照图中曲线进行设置,则可使打磨力保持恒定。

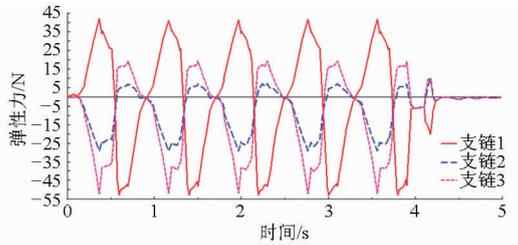


图 8 柔性支链受力曲线

Fig. 8 Forces of three chains

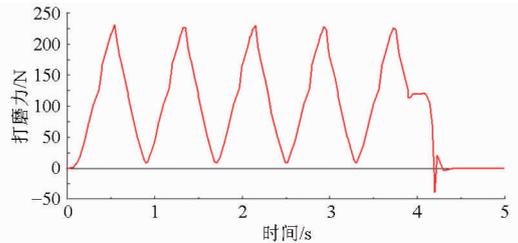


图 9 打磨力变化曲线

Fig. 9 Change of grinding force

4.2 试验分析

针对汽车外壳大尺寸、无凹面、无毛刺等特点,选用打磨直径较大的霹雳豹 A2150 型气动角磨机,打磨头半径为 54 mm,角磨机输出转速为 300 r/min,角磨机打磨面至下平台的距离 $t = 65$ mm,其他尺寸不变;执行机械手采用 YASKAWA 公司的 HP20D 型 6 自由度工业机械手。工作现场如图 10 所示。



图 10 样机测试现场

Fig. 10 Scene of prototype test

打磨平坦曲面时,机械手按照既定轨迹,带动打磨头沿汽车表面移动,角磨机打磨面在打磨机构柔性支链的作用下实时改变工作姿态(偏转角为 θ),并自动与汽车表面贴合,在压力阀和流量阀的控制下,保持接触打磨力及角磨机转速恒定,如图 11a 所示;侧面打磨时,机械手改变姿态,使打磨头正对加工面,重复上述动作,如图 11b 所示。整个试验过程中,无需调整角磨机姿态,无需测量接触力,只需要精确控制机械手的运动轨迹及打磨机构中气缸的压力即可。

根据上述打磨试验过程,当角磨机保持当前转速和打磨力不变,测得仿腕关节打磨机构的极限参数如表 1 所示。在此参数范围内,机械手可保持当



图11 样机试验过程

Fig. 11 Process of prototype test

前姿态,打磨机构可根据工件几何形状作自适应调整,打磨效果不受影响;若超出参数范围,则需要调整机械手姿态,确保角磨机打磨面与工件当前打磨面保持在参数范围内,这可以通过预定机械手的轨迹规划和计算机程序实现。

表1 打磨机构参数

Tab. 1 Parameters of grinding mechanism

参数	数值
打磨头最大偏转角度 $\theta/(\circ)$	24
支链最大变形量 $\Delta l_i/\text{mm}$	15
气缸最大位移 h/mm	22
打磨力最大偏差/ N	0.4
打磨头最大偏转力矩/ $(\text{N}\cdot\text{m})$	1.8

5 结论

(1)设计了一种基于6自由度机械手与3SPS+S的仿腕关节柔性并联打磨机构及机械结构,运用矢量代数法求解运动方程及柔性杆变形量。

(2)分析了仿腕关节柔性并联机构在打磨过程中的受力变化,建立了静力学方程;根据打磨力模型,建立了基于控制模型的角磨机接触力和输出力矩方程。

(3)通过仿真和样机试验,验证了仿腕关节柔性并联打磨机构的自适应运动性能,得到机构的极限运动参数,整个机构结构简单、控制方便、运动灵活,为柔性自适应机构的进一步应用提供了理论基础和试验数据。

参 考 文 献

- 1 Furukawa T, Rye D C, Dissanayake M W, et al. Automated polishing of an unknown three-dimensional surface[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing Surface, 1996, 12(3):261-270.
- 2 武兵书. 中国模具工业的发展及现状[J]. 中国制造业信息化, 2010(8):58-60.
- 3 Wang Lihui, Xi Fengfeng, Zhang Dan. A parallel robotic attachment and its remote manipulation[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2006, 22(5-6):515-525.
- 4 Liao Liang, Xi Fengfeng, Liu Kefu. Modeling and control of automated polishing/deburring process using a dual-purpose compliant toolhead[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2008, 48(12-13):1454-1463.
- 5 Xavier Pessoles, Christophe Tournier. Automatic polishing process of plastic injection molds on a 5-axis milling center[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2009, 209(7):3665-3673.
- 6 Saeid Nahavandi, Mohammad Jashim Uddin, Yasuo Nasu, et al. Automated robotic grinding by low-powered manipulator[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2007, 23(5):589-598.
- 7 王庚祥,原大宁,刘宏昭,等. 空间4-SPS/CU并联机构运动学分析[J]. 农业机械学报, 2012, 43(3):207-212.
Wang Gengxiang, Yuan Daning, Liu Hongzhao, et al. Kinematics analysis of spatial 4-SPS/CU parallel mechanism [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(3):207-212. (in Chinese)
- 8 刘文波,陈白宁,段智敏. 工业机器人[M]. 哈尔滨:东北大学出版社, 2007:36.
- 9 邱焕仁. 一种三并联万向腕关节的理论研究[D]. 沈阳:东北大学, 2008.
- 10 孙立宁,刘宇,祝宇虹. 一种用于腕关节的球面三自由度并联解耦机构位置分析[J]. 中国机械工程, 2003, 14(10):831-833.
Sun Lining, Liu Yu, Zhu Yuhong. A kinetic analysis of 3-DOF decoupled spherical parallel mechanism used for the wrist joint [J]. China Mechanical Engineering, 2003, 14(10):831-833. (in Chinese)
- 11 Lu Yi, Wang Peng, Hou Zhuolei, et al. Kinetostatic analysis of a novel 6-DOF 3UPS parallel manipulator with multi-fingers[J]. Mechanism and Machine Theory, 2014, 78:36-50.

- 9 徐志鹏,王宣银,罗语溪. 高压气动比例减压阀设计与仿真[J]. 农业机械学报,2011,42(1):209-212,222.
Xu Zhipeng,Wang Xuanyin, Luo Yuxi. Design and simulation of a high pressure proportional pneumatic pressure reducing valve [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(1):209-212,222. (in Chinese)
- 10 Krivts I L, Krejnin G V. Pneumatic actuating systems for automatic equipment: structure and design [M]. Boca Raton, FL: CRC Press, 2006.
- 11 安雪斌,潘尚峰. 多体系统动力学仿真中的接触碰撞模型分析[J]. 计算机仿真, 2008, 25(10): 98-101.
An Xuebin, Pan Shangfeng. Analysis of contact model in multi-body system dynamic simulation [J]. Computer Simulation, 2008, 25(10): 98-101. (in Chinese)
- 12 向忠,陶国良,谢建蔚,等. 气动高速开关阀动态压力特性仿真与试验研究[J]. 浙江大学学报:工学版, 2008, 42(5): 845-849,857.
Xiang Zhong, Tao Guoliang, Xie Jianwei, et al. Simulation and experimental investigation on pressure dynamics of pneumatic high-speed on/off valves [J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2008, 42(5): 845-849,857. (in Chinese)
- 13 Hullender D A, Woods R L. Modeling of fluid control components [M]//Fred R P, Constantin C C, Haji-sheikh A, et al. Integral Methods in Science and Engineering. New York: Hemisphere Publishing Corporation, 1986: 608-619.
- 14 Al-ibrahim A M, Otis D R. Transient air temperature and pressure measurements during the charging and discharging processes of an actuating pneumatic cylinder [C]//Proceedings of 45th National Conference on Fluid Power, 1992: 233-239.
- 15 Wang Y, Megli T, Haghgoole M, et al. Modelling and control of electromechanical valve actuator [J]. SAE Transactions, 2002, 111(3): 1780-1789.
- 16 向忠. 气动高速开关阀关键技术研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2010.
Xiang Zhong. Research on the key technologies of pneumatic high-speed on/off valve [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2010. (in Chinese)
- 17 丁丽. 二位三通气动高速开关阀的设计与研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2014.
Ding Li. Design and research on the 2-3 pneumatic high-speed on/off valve [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014. (in Chinese)
- 18 Najafi F, Fathi M, Saadat M. Dynamic modelling of servo pneumatic actuators with cushioning [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2009, 42(7-8): 757-765.
- 19 Zamani J S O A S. Modeling and control of opticeruise—a pneumatic force actuator [D]. Stockholm: KTH, 2007.
- 20 Forrai A, Ueda T, Yumura T. A simple approach to electromagnetic actuator control based on asymptotically exact linearization [J]. Archive of Applied Mechanics, 2005, 74(8): 550-562.

~~~~~

(上接第 407 页)

- 12 韩先国,刘岩龙. 3UPS-S 并联机构单支链驱动奇异分析[J]. 北京航空航天大学学报,2014,40(1):6-9.  
Han Xianguo, Liu Yanlong. Singularity of 3UPS-S parallel mechanism in single limb motion [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2014, 40(1):6-9. (in Chinese)
- 13 Gürsel Alici, Bijan Shirinzadeh. Topology optimisation and singularity analysis of a 3-SPS parallel manipulator with a passive constraining spherical joint [J]. Mechanism and Machine Theory, 2004, 39(2): 215-235.
- 14 Choi Kee-Bong, Lee Jae Jong. Passive compliant wafer stage for single-step nano-imprint lithography [J]. Review of Scientific Instruments, 2005, 76(7): 075106:1-6.
- 15 杨启志,马履中,谢俊. 三平移全柔性并联微动机器人机构静力学分析[J]. 农业机械学报,2007,38(11):110-113.  
Yang Qizhi, Ma Lüzhong, Xie Jun. Static forces analysis of the fully compliant three DOF translational parallel mechanism [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(11):110-113. (in Chinese)
- 16 Wang Guilian, Wang Yiqiang, Zhao Ji. Process optimization of the serial-parallel hybrid polishing machine tool based on artificial neural network and genetic algorithm [J]. Journal of Intelligent Manufacturing, 2012, 23(3): 365-374.
- 17 Lee Min Ki, Park Kun Woo. Kinematic and dynamic models of hybrid robot manipulator for propeller grinding [J]. Journal of Robotic Systems, 1999, 16(3): 137-150.
- 18 Roswell A, Xi F, Liu G. Modeling and analysis of contact stress for automated polishing [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2006, 46(3-4): 424-435.
- 19 Xi F, Zhou D. Modeling surface roughness in the stone polishing process [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2005, 45(4-5): 365-372.
- 20 汪源,朱伟,沈惠平. 一种柔顺并联自适应机构的工作特性分析[J]. 机械设计与研究,2013, 29(4):25-29.  
Wang Yuan, Zhu Wei, Shen Huiping. A novel adaptive flexible parallel mechanism and its operating characteristics analysis [J]. Machine Design and Research, 2013, 29(4):25-29. (in Chinese)