

顾及刚度特性的管内机器人高精度焊缝打磨方法

王永青 艾靖超 李 特* 兰 天 刘海波

大连理工大学高性能精密制造全国重点实验室,大连,116024

摘要:针对管内机器人高精度加工难题,以管内焊缝余高修整打磨为例,提出了一种顾及刚度特性的管内机器人高精度磨削方法。首先基于轮式管内加工机器人建立了考虑气动支撑装置刚度特性的有限元仿真模型,获得了不同加工载荷和位姿下的变形关系;然后建立了基于高度特征的焊缝识别方法,采用三次 B 样条模型建立了焊缝母线参数方程,从而提出了融合刚度补偿量的加工轨迹点生成方法;最后通过机器人样机实验验证了所提方法对于管内焊缝打磨的有效性。结果表明:该方法可将约 1 mm 的焊缝余高精确修整至 0.2 mm 以内,加工后焊缝平均余高与设计余高的误差不超过 5%,能够实现焊缝高精度加工。

关键词:管内机器人;机器人加工;刚度;焊缝打磨

中图分类号: TP182

DOI: 10.3969/j.issn.1004-132X.2025.02.018

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



High Precision Weld Grinding Method of In-pipe Robots Considering Stiffness Characteristics

WANG Yongqing AI Jingchao LI Te* LAN Tian LIU Haibo

Dalian University of Technology, State Key Laboratory of High-performance Precision Manufacturing, Dalian, Liaoning, 116024

Abstract: In response to the difficulty of high-precision machining by in pipe robots, a high-precision grinding method was proposed for in pipe robots considering stiffness characteristics, taking the example of repairing and polishing the residual heights of the weld seams in the pipe. Firstly, based on the wheeled pipe machining robots, a finite element simulation model was established considering the stiffness characteristics of the pneumatic support devices, and the deformation relationship was obtained under different machining loads and poses. Secondly, a weld seam recognition method was established based on height features, and a cubic B-spline model was used to establish the parameter equation of the weld seam busbar, thereby a machining trajectory point generation method was proposed to integrate stiffness compensation; Finally, the effectiveness of the method proposed for polishing weld seams inside pipes was verified through robot prototype experiments. The results show that the method may accurately trim the seam residual height of about 1 mm to less than 0.2 mm, and the error between the average seam residual height and the design residual height after machining is less than 5%.

Key words: in-pipe robot; robot machining; stiffness; weld grinding

0 引言

管道机器人在狭小的管内作业空间内有着良好的应用潜力,能够携带多种传感器和工作机构执行各种任务^[1]。国内外学者面向管道类零件内壁检测、焊接、打磨等场景需求提出了一系列管内机器人自动化设备,从运动驱动方式上可分为轮式、履带式、蠕动式、蛇式等。

针对管道内表面加工、清洁除锈等作业的任务需求,为了获取良好的表面质量,国内外学者从机构以及加工方式两个方面对管内机器人开展研究。陈世彬^[2]针对管道内表面质量问题设计了一

种管内自适应珩磨光整加工装置,以三组独立式自适应机构作为支撑部分,利用传统珩磨头实现管道内表面的光整加工。谢同雨等^[3]设计了一款多模块组成的蛇形管道打磨机器人,各模块之间可以快速拆装,作业时由六组支撑爪支撑于管道内壁,通过力/位混合控制完成打磨作业。XU 等^[4]研制了一种轮式管道打磨机器人,通过 CCD 相机和线激光传感器实现快速移动、定位和抛光,但无法实现机器人自身位姿控制且主要应用于大直径管道抛光。YIN 等^[5]、唐德威等^[6]设计了一款三轴差速轮式管道机器人,解决了机器人通过弯管产生的运动干涉问题,最终实现了管道内焊缝的检测与修磨。DU 等^[7]针对压力管道内壁除

锈作业问题,研制了一种新型履带式移动管道机器人,该机器人可通过弹簧机构被动调节修磨组件与管道内壁压力值,但其变径范围较小。TRUONG-THINH 等^[8]设计了一种用于清洗和检测污水管道的履带式管道移动机器人,采用履带移动机构以便增加机器人与管道内壁接触面积,使得机器人能够轻松越过污水障碍物,清洗机构采用电筒滚筒刷,依据管道与污泥之间的黏滞程度选择不同切割工具。刘芳华等^[9]针对一般管道机器人难以打磨内部缺陷及检测的问题,设计了一种自适应管道内壁检测及打磨机器人,该机器人由行走驱动装置与打磨清扫装置组成,基于三爪卡盘的变径原理实现了管道内部缺陷的打磨及清扫。

然而,现阶段大部分管内机器人只用于管道内部的缺陷检测及异物探测,对管道内部表面进行加工作业的研究报道较少且大多数研究仅停留在被动机构自适应加工或通过力传感器进行磨抛作业阶段,能够对作业区域实现精准可控高精度加工的研究报道极少。李特等^[10-11]面向一种锥形管道类零件的测量和精密加工需求,考虑大范围变径、支撑力可控可调及管道内自适应运动等因素,研制了一种具备锥形自适应变径能力的轮式管道特种机器人。相较于数控机床及传统的工业机器人,本文研究的管道机器人由于采用轮式移动机构及气动支撑机构,操作刚度存在不足。为保证管道内焊缝高精度加工需求,需对管内机器人结构刚度特性进行分析,建立机器人末端在外部载荷作用下的变形关系,根据管道内焊缝轮廓特征识别焊缝所在区域,基于机器人三轴机构运动学模型获取机器人加工过程位姿,虑及管内机器人在加工过程中因自身刚度特性产生的加工误差,对机器人末端刀具运动轨迹进行规划,最后通过机器人样机实验平台验证高精度打磨方法的有效性。

1 管内机器人刚度特性分析

1.1 管内移动机器人设计

管道类零件往往具备大长径比、变径范围大等结构特征,所针对的内焊缝加工区域距离往往距端口较远且加工精度要求较高,为此,设计一款自适应锥形管道内径变化特征且携带高精度智能测量-加工单元的移动式管道特种机器人,如图 1 所示。该机器人由 6 组自适应变径运动移动单元及三自由度测量加工单元组成。移动单元包含气动变径机构、轮式运动机构及机器人本体三部分。

气动变径机构通过铰接车板与运动机构相连接,整体呈前后两组,周向三组呈 120° (共 6 组)等间隔均匀分布,每组均单独由气缸独立式控制,支撑力可调可控,以适应管道内径变化及锥度变化。机器人沿管道轴向移动牵引力由三组运动驱动电机提供,三组运动驱动电机独立控制,每组驱动电机通过锥齿轮换向带动主动轮旋转,达到小空间大驱动的效果。测量加工单元包含三轴运动机构、线激光测量机构及砂轮打磨机构,其中, X 轴与 Z 轴连接滚珠丝杠,将电机回转运动转为直线运动。管内机器人在进行打磨作业时,6 组气动变径机构通过车轮支撑于管道内壁,三轴运动机构基于线激光传感器采集的轮廓特征数据进行插补运动,最终实现管道内焊缝的光整加工。

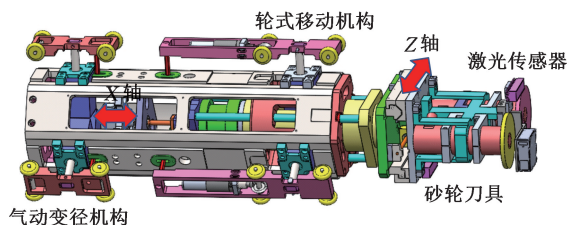


图 1 管内移动加工机器人

Fig.1 In pipe mobile processing robot

1.2 机器人运动学建模

为保证加工目标轮廓精准去除,分析管道移动机器人各关节之间的相对运动关系,用 D-H 方法建立运动学模型,描述各关节在空间坐标系下的位置关系。对管内机器人三轴加工机构建立的连杆坐标系如图 2 所示,在三轴运动机构关节处分别建立一个坐标系,根据关节的轴线及关节转向确定 Z 轴,基于 D-H 原则及右手定则确定各关节坐标系的 X 轴及 Y 轴。为了直接表示待测表面轮廓特征与刀具刀位点所处空间位置,分别在激光传感器接收光线元件处及砂轮刀具与工件接触处建立测量坐标系 T_L 与刀具坐标系 T_{dao} ,基于管内机器人的加工三轴机构实际运动方向确定坐标系的 X 轴与 Z 轴,根据右手定则确定 Y 轴。基于管内机器人自身结构特征可获取各关节之间的 D-H 参数,具体参数见表 1。其中, X 为轴向机构移动距离; A 为回转机构转动角度; R 为径向机构移动距离。

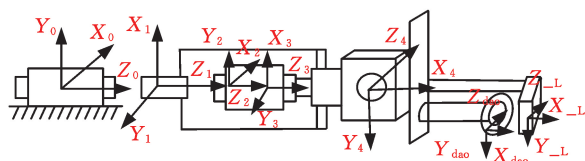


图 2 简化运动学模型结构

Fig.2 Simplified kinematic model structure

表 1 D-H 参数
Tab.1 D-H parameters

序号	相邻关节 i 之间 夹角 $\alpha_{i-1}/(^{\circ})$	臂杆长度 a_{i-1}/mm	关节转角 $\theta_i/(^{\circ})$	关节偏移 d_i/mm
1	0	0	90	X
2	0	0	A	286.56
3	0	0	0	446.5
4	0	90	0	R
4-dao	0	248	0	-170
4-L	0	275	0	-120

相邻坐标系下连杆齐次变换矩阵 ${}^{i-1}\mathbf{T}$ 可表示为

$${}^{i-1}\mathbf{T} = \mathbf{Rot}(x, \alpha_{i-1})\mathbf{Trans}(x, a_{i-1})\mathbf{Rot}(z, \theta_i)\mathbf{Trans}(z, d_i) = \begin{bmatrix} c\theta_i & -s\theta_i & 0 & a_{i-1} \\ s\theta_i c\alpha_{i-1} & c\theta_i c\alpha_{i-1} & -s\alpha_{i-1} & -d_i s\alpha_{i-1} \\ s\theta_i s\alpha_{i-1} & c\theta_i s\alpha_{i-1} & c\alpha_{i-1} & d_i c\alpha_{i-1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中： $c\theta_i, s\theta_i$ 分别为 $\cos \theta_i, \sin \theta_i$ 的缩写； $\mathbf{Rot}()$ 、 $\mathbf{Trans}()$ 分别为旋转矩阵和平移矩阵。

为获取机器人三轴机构最终运动轨迹，需将刀具坐标下生成的加工点与测量坐标系下采集的内焊缝轮廓特征信息点建立等式关系，测量坐标系 T_L 与刀具坐标系 T_{dao} 都可以通过齐次变换获得与机器人基坐标系的位置关系：

$${}^0\mathbf{T} = {}^0\mathbf{T}_1 \frac{1}{2}\mathbf{T}'_2 \frac{2}{3}\mathbf{T}'_3 \frac{3}{4}\mathbf{T}'_4 \mathbf{T}_L \quad (2)$$

$${}^{\text{dao}}\mathbf{T} = {}^0\mathbf{T}'_1 \frac{1}{2}\mathbf{T}'_2 \frac{2}{3}\mathbf{T}'_3 \frac{3}{4}\mathbf{T}'_4 \mathbf{T}_{\text{dao}} \quad (3)$$

式中： ${}^0\mathbf{T}_1, \frac{1}{2}\mathbf{T}'_2, \frac{2}{3}\mathbf{T}'_3$ 分别为转换矩阵中的参数，代表机器人在测量过程中三轴机构的位置姿态； ${}^0\mathbf{T}'_1, \frac{1}{2}\mathbf{T}'_2, \frac{2}{3}\mathbf{T}'_3$ 分别为转换矩阵中的 D-H 参数，代表机器人加工过程中三轴机构的位置姿态。

基于激光传感器测量坐标系与机器人基坐标系之前的运动学关系，测量坐标系下所采集的焊缝轮廓截面轮廓信息点可通过齐次坐标变化在基坐标系中直接进行表达，联立机器人测量过程中三轴机构位置姿态可得：

$${}^0\mathbf{P} = {}^0\mathbf{T}_1 \frac{1}{2}\mathbf{T}'_2 \frac{2}{3}\mathbf{T}'_3 \frac{3}{4}\mathbf{T}'_4 \mathbf{T}_L \mathbf{P}_L \quad (4)$$

$$\mathbf{P}_L = [x_L \quad 0 \quad z_L \quad 1]^T$$

式中： x_L, z_L 分别为线激光传感器测量获取的轴向距离值与纵向距离值。

获取激光传感器对待测目标曲面的三维轮廓点云数据后，需对点云数据进行拟合重建，使得目标加工曲面点云坐标可以在机器人基坐标系下表示。本文刀具坐标系建立在加工时机器人砂轮刀具与内焊缝打磨接触点，即在加工过程中刀具坐标系原点为测量坐标系下由采集的焊缝轮廓特征生成的加工规划点，两者在空间位置上指向唯一确定的数据点，改变机器人三轴位置姿态即可使砂轮刀具运动到该加工点。因此，测量坐标下测

得的轮廓特征点与加工坐标系下的加工轨迹点都可以在机器人基坐标系 T_0 下表示，通过建立等式关系求解机器人在磨削加工过程中三轴位置姿态：

$${}^0\mathbf{P} = {}^0\mathbf{T}'_1 \frac{1}{2}\mathbf{T}'_2 \frac{2}{3}\mathbf{T}'_3 \frac{3}{4}\mathbf{T}'_4 \mathbf{T}_{\text{dao}} \mathbf{P}_{\text{dao}} \quad (5)$$

$$\mathbf{P}_{\text{dao}} = [0 \quad 0 \quad 0 \quad 1]^T$$

式中： \mathbf{P}_{dao} 为刀具坐标系原点坐标；各转换矩阵中 X、R、A 值为待求解未知量，其具体含义为机器人三轴加工机构处于磨削加工状态时三轴位置姿态。

1.3 弱刚性特性分析及仿真

管道特种机器人采用 6 组分布式独立变径机构作为支撑单元，能够增强对壳体零件结构的适应性，便于主动调整机器人自身位置姿态，但采用气动气缸作为执行单元时，由于空气的可压缩性较强，在受外部载荷变化和外力干扰的情况下自身状态难以维持稳定。建立气压弹簧刚度的数学关系表达式来描述气压弹簧刚度与活塞位置关系，依据活塞受力情况可列出方程：

$$p_a A_a - p_b A_b = F - G \quad (6)$$

式中： p_a 为活塞杆进气腔压力； A_a 为进气腔的活塞面积； p_b 为活塞杆排气腔压力； A_b 为进气腔的活塞面积； F 为外部载荷作用力； G 为气缸重力。

在气体在压缩过程中气压弹簧刚度会不断发生改变，气缸内部的气体温度也会随之改变，故引入气体多变指数 m 。在气压弹簧刚度变化的过程中，气缸进气腔与排气腔的气体不断地发生改变，因此需要给出气缸两腔压力与体积的关系：

$$p_a = p_{a0} (V_{a0}/V_a)^m \quad (7)$$

$$p_b = p_{b0} (V_{b0}/V_b)^m \quad (8)$$

式中： V_{a0} 为气压平衡时气缸进气腔的容积； V_a 为气压平衡时气缸排气腔的容积； V_{b0} 为活塞杆任意位置时进气腔的容积； V_b 为活塞杆任意位置时排气腔的容积； p_{a0} 为气压平衡时进气腔的压力； p_{b0} 为气压平衡时排气腔的压力。

将式(7)、式(8)代入式(6)可得

$$p_{a0} \left(\frac{V_{a0}}{V_a}\right)^m A_a - p_{b0} \left(\frac{V_{b0}}{V_b}\right)^m A_b + G = F \quad (9)$$

气体在压缩过程中气压弹簧刚度的影响因素较为复杂，非线性因素较强，直接采用胡克定律进行线性方程的推导存在较大偏差，故直接对其在所受载荷方向进行求导，得到其刚度公式：

$$k_h = \frac{dF}{dx} = A_b m p_{b0} \frac{V_{b0}^m}{V_b^{m+1}} \frac{dV_b}{dx} - A_a m p_{a0} \frac{V_{a0}^m}{V_a^{m+1}} \frac{dV_a}{dx} \quad (10)$$

气缸活塞杆工作位置在平衡位置附近，故 $V_a \approx V_{a0}, V_b \approx V_{b0}$ ，结合式(10)可得

$$k_h = \frac{A_b^2 m p_{b0}}{V_b} + \frac{A_a^2 m p_{a0}}{V_a} \quad (11)$$

由式(11)可知,气缸弹簧刚度随输入气压增加而增加,当输入气压一定时,其刚度值与进气腔和排气腔的体积有关,即与气缸活塞杆伸出长度有关。当管道特种机器人支撑于管道内壁时,其自身姿态是固定的,即 6 组气缸活塞杆伸出长度为定值。机器人进行管道打磨加工作业时,因气缸及支撑轮刚性较弱,导致在进行磨削加工时,末端存在较大变形,且变形与机器人三轴位置相关,具备姿态依赖性,故需对机器人处于打磨加工状态时进行有限元仿真分析,观测末端变形量。

该管道机器人选取的支撑气动执行元件为 SMC 薄型气缸,其结构参数见表 2。针对管道机器人测量加工单元的三轴机构处于不同位置时的工作状态,在末端执行元件加工接触区域施加磨削力外部载荷,为保证其末端变形量只与气缸刚度值与车轮变形量相关,将气缸活塞杆与气缸缸体之间的接触设置为弹簧接触并赋予相应刚度值,更改车轮材料属性,其他接触默认为绑定解除,以免发生额外的变形。

表 2 薄型气缸结构参数

Tab.2 Structural parameters of thin cylinder

气缸缸径/mm	行程范围/mm	活塞杆直径/mm	总长度/mm
63	10~50	20	94

为了获取管内机器人处于不同工作环境下末端变形量,分析管内机器人在不同磨削作用力下、加工三轴机构位于不同姿态下机器人自身刚度特性,故单独改变磨削力与机器人三轴姿态对其进行有限元仿真,获取以下关系:

$$\epsilon = f(x, A, z, F_c) \quad (12)$$

式中: ϵ 为机器人末端变形量; F_c 为加工时的磨削力。

2 加工轨迹规划

2.1 焊缝特征识别

获取管道内焊缝点云模型后,为了得到理想目标曲面轮廓,需对刀位点进行合理规划以保证加工表面精度和质量。基于管道内焊缝高度特征信息识别焊缝区域所处位置,针对线激光传感器采集的某一截面母线轮廓 K_N ,采用最小二乘法,以母线左右两侧各 k 个点作为左右两侧初始点,对管道内壁基材进行直线拟合:

$$\left. \begin{aligned} y &= ax + b \\ a &= \frac{\sum_{i=0}^k x_i y_i - k \bar{x} \bar{y}}{\sum_{i=1}^k x_i^2 - k \bar{x}^2} \\ b &= \bar{y} - a \bar{x} \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

式中: (x_i, y_i) 为线激光传感器采集点坐标; \bar{x} 为参与拟合点的 x 的均值; \bar{y} 为参与拟合点的 y 的均值; a, b 分别为拟合出直线的斜率与截距。

从两侧第 $k+1$ 个点开始计算每一点到拟合出基材线的距离,设定距离阈值为 d_0 ,若当前点到基材线的距离 $d_i < d_0$,则认为该点仍属于基材线上的点,加入拟合基材线的初始点,重新进行基材线拟合;若当前点到基材线的距离 $d_i \geq d_0$,则判断该点为焊缝的特征点,如图 3 所示,由此确定焊缝左右特征点,取中间点即为焊缝中心特征点。

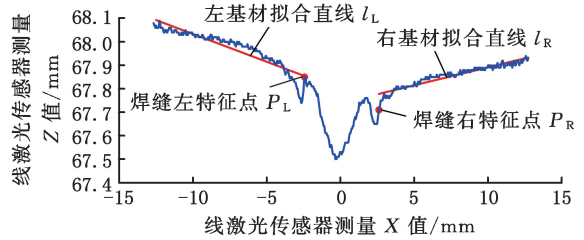


图 3 单截面焊缝轮廓

Fig.3 Single section weld profile

取各条母线的焊缝中心点拟合平面 L 并计算每条母线焊缝中心点至拟合平面的距离 D_i ,计算公式如下:

$$\left. \begin{aligned} A'x + B'y + C'z + D' &= 0 \\ \left[\begin{array}{ccc} \sum x_i^2 & \sum x_i y_i & \sum x_i \\ \sum x_i y_i & \sum y_i^2 & \sum y_i \\ \sum x_i & \sum y_i & n \end{array} \right] \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \sum x_i z_i \\ \sum y_i z_i \\ \sum z_i \end{bmatrix} \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

$$a = -\frac{A'}{C'} \quad b = -\frac{B'}{C'} \quad c = -\frac{D'}{C'}$$

$$D_i = \frac{|A'x_i + B'y_i + C'z_i + D'|}{\sqrt{A'^2 + B'^2 + C'^2}} \quad (15)$$

式中: D_i 为焊缝中心点到拟合平面的距离; (x_i, y_i, z_i) 为焊缝中心点坐标; $A' \sim D'$ 为平面公式的常数项; n 为参与拟合点的数量。

设定焊缝中心点至拟合平面距离阈值 D_0 ,若 $D_i > D_0$,则判定该条母线为异常母线并舍去。滤去异常母线后重新拟合焊缝中心点平面,计算各母线焊缝中心至拟合平面的距离,取左右两侧最大距离处生成与拟合平面相平行的左右边界面,与各母线的交点即为焊缝左右边界点,至此,完成管道内焊缝左右边界点的提取,如图 4 所示。

2.2 加工轨迹规划

管道内焊缝往往具备形状不规则、错边错缝等特征,为了实现焊缝有效去除及焊接管道内壁两侧平滑过渡,在单一焊缝母线左右边界点间进行加工轨迹规划。取焊缝左右边界点横坐标均值为焊缝中心点横坐标值,纵坐标值取左右边界点

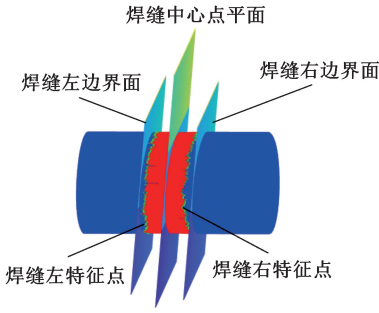


图4 焊缝边界特征点提取

Fig.4 Extraction of weld seam boundary feature points

较大纵坐标值,焊缝左右边界点与焊缝中心点连线即为单一母线上焊缝理想加工轮廓。考虑到焊缝具备一定宽度及加工刀具轮廓形状特征,采用多个平行截面对焊缝轮廓曲面进行切割,通过截面与曲面的相交线获取每圈加工点,机器人三轴加工机构通过多圈走刀完成表面光整加工。

目前所生成的加工点是一系列离散点,点与点相互独立,若要生成光滑连续的打磨路径,需采用B样条曲线插值法对加工轨迹点进行拟合。以焊缝中心点拟合生成曲线为例,假定点集为 $T(r)$,其中包含 $m+1$ 个节点矢量 r_0, r_1, \dots, r_m , $n+1$ 个控制点 t_0, t_1, \dots, t_n ,点集 $T(r)$ 的曲线方程为

$$T(r) = [t_0 \quad t_1 \quad \dots \quad t_n] \begin{bmatrix} B_{0,k}(r) \\ B_{1,k}(r) \\ \vdots \\ B_{n,k}(r) \end{bmatrix} = \sum_{i=0}^n t_i B_{i,k}(r) \quad (16)$$

式中: $B_{i,k}(r)$ 为控制点 t_i 所对应的第 i 个 k 阶的样条函数。

将B样条曲线基函数定义为

$$B_{i,0}(r) = \begin{cases} 1 & u_i \leq r \leq u_{i+1} \\ 0 & r < u_i \text{ 或 } r > u_{i+1} \end{cases}$$

$$B_{i,k}(r) = \frac{u - u_i}{u_{i+k-i} - u_i} B_{i,k-1}(r) + \frac{u_{i+k} - u}{u_{i+k} - u_{i+1}} B_{i+1,k-1}(r) \quad (17)$$

式中: $B_{i,0}(r)$ 为一阶样条函数,为阶跃函数; u_i 为相邻基函数相交的节点。

为保证加工机构打磨内焊缝的运行轨迹是平滑的曲线且运动过程中没有较大抖动,需保证拟合出B样条曲线二阶导数连续,而随着样条曲线阶数的增大,计算复杂度、时间也随之增加,对加工轨迹点的拟合采用三次B样条曲线插值法。

然而,管内机器人在对内焊缝进行打磨加工时,由于自身结构刚度特性,往往所规划的加工轨迹点与实际轨迹点存在一定偏移,如图5所示。由于机器人加工时三轴运动机构不受轴间磨削力的作用,故实际运动轨迹与名义运动轨迹仍处于

同一平面。基于所规划的加工轨迹与焊缝初始轮廓特征可以获得砂轮刀具加工时磨削深度,进而可获取机器人末端所受外部载荷大小,因此,机器人末端加工结构在进行整圈回转加工的过程中,结合考虑及机器人结构刚度特性的有限元仿真模型可在当前生成的加工轨迹点上进行误差偏移补偿,生成结合刚度补偿量的加工轨迹点:

$$\begin{bmatrix} r'_{ix} \\ r'_{iy} \\ r'_{iz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{ix} \\ r_{iy} \\ r_{iz} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta_{ix} \\ \Delta_{iy} \\ \Delta_{iz} \end{bmatrix} \quad (18)$$

式中: r'_i 为补偿后加工轨迹点; r_i 为初始加工点; Δ 为加工点末端变形量。

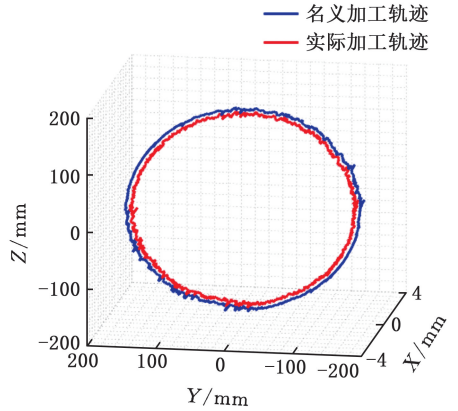


图5 机器人末端加工轨迹

Fig.5 Robot end machining trajectory

机器人末端误差变形量 Δ 主要取决于三轴加工机构位置,基于名义加工点坐标可将误差变形量进行正交分解以补偿各方向误差值。补偿后加工点经齐次坐标变换可以在基坐标系下进行表示,并进行B样条曲线拟合:

$$T(r') = [t'_0 \quad t'_1 \quad \dots \quad t'_n] \begin{bmatrix} B_{0,k}(r') \\ B_{1,k}(r') \\ \vdots \\ B_{n,k}(r') \end{bmatrix} = \sum_{i=0}^n t'_i B_{i,k}(r') \quad (19)$$

获得打磨路径的曲线解析表达式后,需对生成的打磨路径进行离散化,生成一系列的插值点。采用等弦高插补法对拟合的三次B样条曲线进行离散化插补,保证每段插值的弦高均相等,在保障精度的前提下最大限度地减少插补点的个数,以提高加工效率,插补线段的步长与弦差关系示意图见图6。其中, P_i 为刀具与焊缝接触点, R_i 为曲率半径, L 为步长, δ 为弦高。

由于在加工过程中,两个相邻的插补点之间距离很近,可以假设 $R_i = R_{i+1} = R = \min(R_i, R_{i+1})$,故有

$$R^2 = (R - \delta)^2 + (L/2)^2 \quad (20)$$

解得步长 L 为

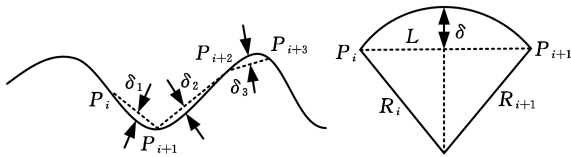


图 6 等弦高插补法确定步长

Fig.6 Determining step size using equal chord height interpolation method

$$L = 2 \sqrt{2R\delta - \delta^2} \quad (21)$$

至此,整条管道内焊缝虑及刚度特性的加工轨迹规划完成。

3 实验验证

3.1 实验平台的搭建

机器人实物样机如图 7 所示,整体包括变径移动单元与测量加工单元。该实验平台硬件结构主要包括伺服 PC 控制器、伺服驱动电机、驱动器、阀岛、气缸、线激光传感器及加工电主轴。



图 7 管道特种机器人实物样机

Fig.7 Physical prototype of pipeline special robot

结合线激光传感器采集轮廓特征信息及回转机构实时位置值,在机器人回转轴携带传感器进行整圈回转的过程中,传感器以一定频率对内焊缝轮廓特征进行数据采集并记录三轴运动机构位置值,获取管道内焊缝轮廓点云数据(图 8)。

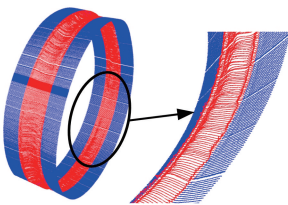


图 8 管道内焊缝轮廓点云数据

Fig.8 Point cloud data of internal weld seam contour in pipelines

3.2 加工轨迹规划

为保证机器人整体刚度模型的准确性,首先需对单一气动支撑装置建立有限元仿真模型,分析其在外力作用下的活塞杆变形量,结合气缸弹簧刚度模型设定弹簧刚度值为 50 N/mm,逐步阶梯式增加外部载荷力,仿真结果如图 9 所示。

本文涉及的管内机器人在加工过程中其自身轴线重合于管道中心轴线,在实际工作中机器人

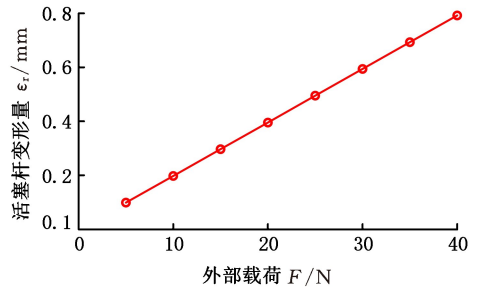


图 9 气缸受不同外部载荷变形量

Fig.9 The cylinder deforms under different external loads

轴向移动机构与径向移动机构位置基本不变,其末端刚度特性主要取决于回转机构角度位置,三轴某一姿态下末端受力变形如图 10 所示。

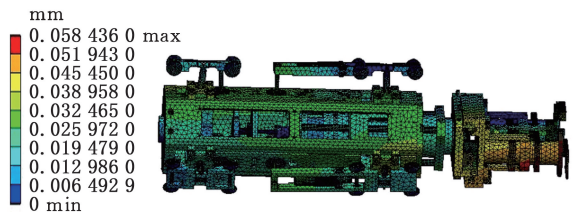


图 10 回转机构某一角度末端受力变形

Fig.10 The end of the rotating mechanism is deformed due to force at a certain angle

针对每组车板连接 4 组滚轮且与锥形管道内壁完全接触的工作情形,对 16 组不同角度时的回转机构进行变形仿真,机器人末端变形量如图 11 所示。

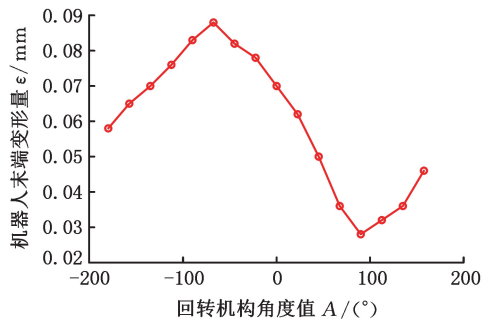


图 11 机器人末端受力变形

Fig.11 Deformation of robot end under force

为了更加准确地获取管内机器人处于不同工作状态下的模型变形量,对机器人末端受不同外部载荷、在三轴运动机构位于不同姿态下机器人末端的刚度特性进行分析。单独改变机器人末端所受外部载荷与机器人三轴位置姿态进行有限元仿真,如图 12 所示。

结合机器人末端刚度特性重新生成每条焊缝母线的加工轨迹,如图 13 所示。依据单条母线下焊缝轮廓左右边界特征点可定义该截面下名义加工轨迹,机器人实际加工轨迹与名义加工轨迹因自身刚度特性存在误差 ϵ ,为保证机器人打磨焊缝余高精度要求,对名义加工轨迹进行补偿,取补

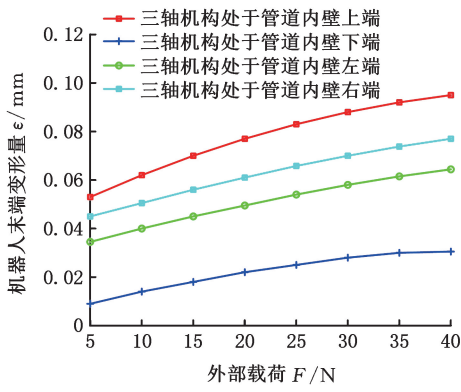


图 12 三轴机构不同位姿下末端受力变形

Fig.12 End effector deformation under different postures of three-axis mechanism

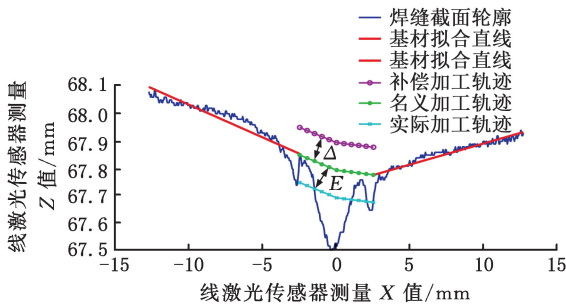


图 13 单截面加工轨迹补偿示意图

Fig.13 Schematic diagram of single section machining trajectory compensation

偿量 $\Delta = \epsilon$ 对该截面轨迹进行补偿规划,通过拟合整圈样条曲线生成补偿加工轨迹。

3.3 实验结果分析

管内机器人对内焊缝打磨加工如图 14 所示,6 组气缸通过车轮内撑于管道内壁,末端三轴机构基于采集的轮廓特征信息完成插补运动。此时主轴转速为 5000 r/min,刀具表面线速度为 36.63 m/s,三轴插补速度设定为 F500。



图 14 管内特种机器人磨削焊缝

Fig.14 Special robots inside the pipe grind welds

机器人完成内焊缝磨削加工后采用线激光传感器对打磨后的目标曲面进行数据采集,通过对比同一条焊缝母线加工前后轮廓特征信息评定加工质量标准,焊缝加工前后对比如图 15 所示。

由图 15 可以看出,本文算法可以精准识别单一母线上的焊缝左右特征点,三轴加工机构末端

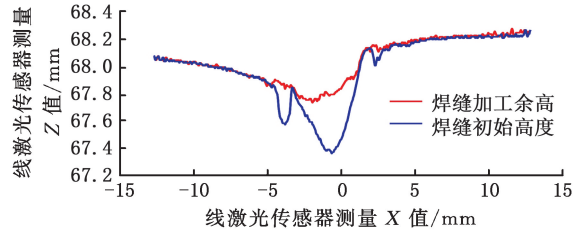
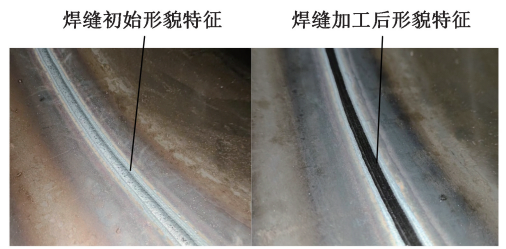


图 15 管道内焊缝加工前后对比

Fig.15 Comparison of welding seams inside pipelines before and after processing

加工轨迹能够按照规划轨迹进行运动,有效去除内焊缝,实现管道内表面型面光整。定义 d_{rms} 为焊缝打磨后焊缝余高均方根误差(表示每条焊缝截面余高与理想余高偏移程度):

$$d_{rms} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (d_i - d)^2} \quad (22)$$

式中: d_i 为实际焊缝余高; d 为规划焊缝余高。

为防止加工过程中损伤基材,规划焊缝打磨余高为 0.08 mm。三组焊缝打磨结果见表 3,打磨前焊缝初始平均最大高度为 0.978 mm,平均高度为 0.7035 mm;打磨加工后焊缝最大余高为 0.138 mm,焊缝平均高度为 0.0821 mm,为原始高度的 11.67%,可满足对焊缝余高打磨精度的要求。

表 3 焊缝打磨前后高度的测量

Tab.3 Measurement of weld height before and after polishing

	mm			
序号	1	2	3	均值
初始最大高度	0.968	0.914	1.052	0.978
初始平均高度	0.7228	0.6746	0.7128	0.7035
加工后最大高度	0.1302	0.1443	0.133	0.136
加工后平均高度	0.078	0.0814	0.0817	0.0821
均方根误差	0.0298	0.0281	0.0259	0.0279

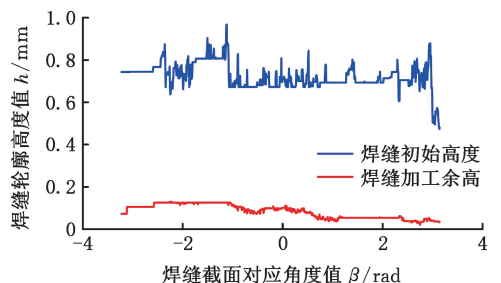


图 16 组 1 焊缝打磨结果

Fig.16 Group 1 Weld Grinding Results

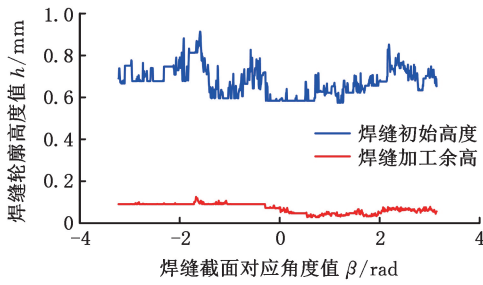


图 17 组 2 焊缝打磨结果

Fig.17 Group 2 Weld Grinding Results

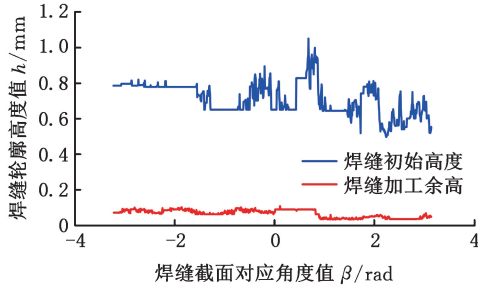


图 18 组 3 焊缝打磨结果

Fig.18 Group 3 Weld Grinding Results

4 结语

本文针对管内机器人实现管道目标区域高精度精密加工难题,通过建立机器人不同姿态下末端受外部载荷的有限元仿真模型,提出了一种虑及自身结构刚度特性的管道内焊缝高精度打磨方法,基于管道内焊缝高度轮廓特征及机器人运动学模型解算机器人加工时三轴位置,采用三次B样条方法拟合曲线与等弦高插补方法融合刚度补偿量生成刀具加工插补点,并通过机器人样机试验平台验证了本文方法能够有效去除管道内焊缝余高且加工余量可控可调,实现了管道内焊缝的高精度加工。

参考文献:

[1] KAHNAMOEI J T, MOALLEM M. A Comprehensive Review of In-pipe Robots[J]. Ocean Engineering, 2023, 277:114260.

[2] 陈世彬. 管道内表面自适应珩磨光整加工装置的设计与研究[D]. 太原:太原理工大学, 2016.

CHEN Shibin. Design and Research of Adaptive Honing and Finishing Device for Pipeline Inner Surface[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2016.

[3] 谢同雨, 李清, 丁煜文, 等. 多模块蛇形管道打磨机器人的设计与分析[J]. 机器人, 2020, 42(6):672-685.

XIE Tongyu, LI Qing, DING Yuwen, et al. Design

and Analysis of a Multi-module Snake Shaped Pipeline Grinding Robot[J]. Robot, 2020, 42(6):672-685.

- [4] XU Zili, LU Song, YANG Jun, et al. A Wheel-type In-pipe Robot for Grinding Weld Beads[J]. Advances in Manufacturing, 2017, 5(2):182-190.
- [5] YIN Canhui, TANG Dewei, DENG Zongquan. Development of Ray Nondestructive Detecting and Grinding Robot for Weld Seam in Pipe[C]// 2017 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO). Macao, 2017:208-214.
- [6] 唐德威, 李庆凯, 姜生元, 等. 三轴差速式管道机器人过弯管时的差速特性及拖动力分析[J]. 机器人, 2010, 32(1):91-96.
- TANG Dewei, LI Qingkai, JIANG Shengyuan, et al. Differential Property and Traction Force of Triaxial Differential Pipeline Robot in Elbow[J]. Robot, 2010, 32(1):91-96.
- [7] DU Xingji, CHEN Defang, TAN Wuhao, et al. A Novel Robotic System for Inner Wall Derusting and Grinding of Pressure Pipelines[C]// Proceedings of the 2016 International Conference on Artificial Intelligence and Engineering Applications. Atlantis Press, 2016:496-499.
- [8] TRUONG-THINH N, NGOC-PHUONG N, PHUOC-THO T. A Study of Pipe-cleaning and Inspection Robot[C]// 2011 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics. Karon Beach, 2011:2593-2598.
- [9] 刘芳华, 孙威. 自适应管道打磨机器人的通过性分析与仿真[J]. 机床与液压, 2021, 49(21):15-21.
- LIU Fanghua, SUN Wei. Analysis and Simulation of the Passability of Adaptive Pipe Grinding Robot [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2021, 49(21): 15-21.
- [10] 李特, 刘海波, 白承栋, 等. 一种变径壳体内焊缝随形磨抛加工机器人:CN202111071407.X[P]. 2021-12-14.
- LI T, LIU Haibo, BAI Chengdong, et al. The Utility Model Relates to A Robot for Polishing and Polishing Internal Welds of A Variable Diameter Shell:CN202111071407.X[P]. 2021-12-14.
- [11] 李特, 刘海波, 白承栋, 等. 一种锥形壳体内焊缝测量-打磨机器人:ZL202010222957.6[P]. 2020-06-19.
- LI T, LIU Haibo, BAI Chengdong, et al. The Utility Model Relates to A Welding Seam Measuring and Grinding Robot for Conical Shell: ZL202010222957.6[P]. 2020-06-19.

(下转第 368 页)

- LAN Xianhui, LI Huiwu, WANG Jinqun, et al. Application Summary and Discussion of Pro/E's Trajectory Parameter Trajpar[J]. Mechanical Engineer, 2015(9):102-103.
- [14] 韩潇然. 编织钢丝绳弯曲状态下力学与摩擦磨损性能研究[D]. 济南: 济南大学, 2021:25-41.
HAN Xiaoran. Research on the Mechanical and Friction and Wear Properties of Braided Steel Wire Rope under Bending Condition[D]. Jinan: University of Jinan, 2021:25-41.
- [15] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 金属材料 拉伸试验 第1部分: 室温试验方法: GB/T 228.1—2010[S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Metallic Materials—Tensile Testing—Part 1: Method of Test at Room Temperature: GB/T 228.1—2010 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2011.
- [16] 艾建光, 姜峰, 言兰. TC4-DT 钛合金材料动态力学性能及其本构模型[J]. 中国机械工程, 2017, 28(5):607-616.
AI Jianguang, JIANG Feng, YAN Lan. Dynamic Mechanics Behavior and Constitutive Model of TC4-DT Titanium Alloy Materials[J]. China Mechanical Engineering, 2017, 28(5):607-616.
- [17] 朱传敏, 顾鹏, 刘丁豪, 等. 包含颈缩失稳的中厚钢板应力-应变关系[J]. 中国机械工程, 2020, 31(9):1037-1042.
ZHU Chuanmin, GU Peng, LIU Dinghao, et al. Strain-stress Relation of Medium-thickness Steel Plates Including Necking Stages[J]. China Mechanical Engineering, 2020, 31(9):1037-1042.
- [18] 国家安全生产监督管理总局. 煤矿用电缆 第4部分: 额定电压 1.9/3.3kV 及以下采煤机金属屏蔽软电缆: MT/T 818.4—2009[S]. 北京: 煤炭工业出版社, 2010.
State Administration of Quality and Technical Supervision of the People's Republic of China. Cables for Coal Mine—Part 4: Flexible Cables with Metallic Screen for Use with Coal Cutters of Rated voltages up to and Including 1.9/3.3 kV: MT/T 818.4—2009[S]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 2010.
- [19] 胡志伟. 海缆电气和机械故障对光纤温度/应变影响的建模分析和特征提取[D]. 北京: 华北电力大学, 2019:38-44.
HU Zhiwei. Modeling Analysis and Feature Extraction of the Influence of Submarine Cable Electrical and Mechanical Faults on Optical Fiber Temperature/Strain[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2019:38-44.
- [20] 柳小花. 光纤复合海底电缆扭转与磨损特性的有限元分析[D]. 北京: 华北电力大学, 2017:12-24.
LIU Xiaohua. Finite Element Analysis of Torsion and Wear Characteristics of Optical Fiber Composite Submarine Cable [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2017:12-24.
- [21] 张雯玥. 高铁施工装备用液压盘式制动器极值预测及疲劳寿命分析[D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2023:54-62.
ZHANG Wenyue. Extreme Value Prediction and Fatigue Life Analysis of Hydraulic Disc Brake for High-speed Rail Construction Equipment[D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Tiedao University, 2023: 54-62.

(编辑 陈勇)

作者简介: 赵丽娟, 女, 1964年生, 教授、博士研究生导师。研究方向为工矿装备自动化与智能化、机械系统动力学分析与控制、机电液一体化系统的仿真与应用。E-mail: zlj2120@163.com。
白忠健* (通信作者), 男, 1997年生, 博士研究生。研究方向为工矿装备自动化与智能化。E-mail: xb19971030@163.com。

本文引用格式:

赵丽娟, 白忠健, 谢波, 等. 采煤机移动软电缆机械特性研究[J]. 中国机械工程, 2025, 36(2): 359-368.

ZHAO Lijuan, BAI Zhongjian, XIE Bo, et al. Study of Mechanical Characteristics of Soft Electrical Cables in Mining Machines [J]. China Mechanical Engineering, 2025, 36(2): 359-368.

(上接第 358 页)

(编辑 陈勇)

作者简介: 王永青, 1969年生, 男, 教授、博士研究生导师。研究方向为测量-加工一体化制造理论与技术、装备, 在机测量理论与技术等。E-mail: yqwang@dlut.edu.cn。李特* (通信作者), 1987年生, 男, 副教授、博士研究生导师。研究方向为仿生机器人、特种加工机器人、机器人化智能制造等。E-mail: teli@dlut.edu.cn。

本文引用格式:

王永青, 艾靖超, 李特, 等. 顾及刚度特性的管内机器人高精度焊缝打磨方法[J]. 中国机械工程, 2025, 36(2): 351-358.

WANG Yongqing, AI Jingchao, LI Te, et al. High Precision Weld Grinding Method of In-pipe Robots Considering Stiffness Characteristics[J]. China Mechanical Engineering, 2025, 36(2): 351-358.