

基于最大刚度原则的铣削机器人位姿确定方法

宜亚丽^{1,2*} 程阳洋² 陈晓卫² 陈一凡² 张振东² 金贺荣^{1,2}

1.燕山大学起重机械关键技术全国重点实验室,秦皇岛,066004

2.燕山大学机械工程学院,秦皇岛,066004

摘要:针对机器人弱刚度位姿下开槽铣削加工精度低的问题,提出一种基于最大刚度原则的机器人位姿确定方法。首先通过关节刚度辨识实验获取刚度;然后结合刚度定向评价指标分析工作平面刚度的分布,并基于刚度最大原则求解机器人最优铣削位姿;最后开展末端加载与铣削试验。研究表明,铣削高度 1.6 m、1.2 m 的最优姿态末端综合变形量最小值分别为 92 μm 和 63 μm ;位姿优化后,铣削振动幅值最大减小 60.88%,最大壁厚误差仅 40 μm 。

关键词: 机器人铣削;刚度;加工精度;冗余角

中图分类号: TP242.2

DOI: 10.3969/j.issn.1004-132X.2025.07.017

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



A Determining Method for Milling Robot Poses Based on Principles of Maximum Stiffness

YI Yali^{1,2*} CHENG Yangyang² CHEN Xiaowei² CHEN Yifan²
ZHANG Zhendong² JIN Herong^{1,2}

1.State Key Laboratory of Crane Technology, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei, 066004

2.School of Mechanical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei, 066004

Abstract: To address the issues of low machining accuracy during slot milling in robot weak-stiffness poses, a robot pose determination method was proposed based on maximum stiffness principle. Firstly, the stiffness was obtained through joint stiffness identification experiments. Then, the stiffness distribution in working plane was analyzed by stiffness-oriented evaluation indices, and the optimal robot milling poses were solved based on the maximum stiffness principle. Finally, end-loading and milling tests were carried out. The results show that the minimum end-effector comprehensive deformations are as 92 μm and 63 μm at the milling heights of 1.6 m and 1.2 m respectively. After pose optimization, the milling vibration amplitude is reduced by up to 60.88%, and the maximum wall thickness error is only 40 μm .

Key words: robot milling; stiffness; machining accuracy; redundant angle

0 引言

大型薄壁筒类零件广泛用于航空、航天领域,该类零件具有尺寸大、加工可达性差、刚性弱、加工精度要求高等特征,其加工难度已经超过传统数控机床的加工能力^[1-2]。人工修磨方式过分依赖工人经验,无法有效保证筒类零件壁厚与阶差的精度要求。工业机器人具备较强的环境和任务适应能力、出色的人机交互与协同特性、较高的灵活性及显著的成本优势,在航空航天制造领域具有广阔应用前景^[3-4]。

近年来,以工业机器人为运动主体,装配末端执行器的加工单元作业模式备受青睐。然而,工业机器人固有的串联结构使其刚度仅为数控机床的 2%~5%^[5]。工业机器人的弱刚度特性导致

其对工作载荷的耐受能力偏低,严重影响其定位精度和产品加工质量。机器人加工系统的刚度是影响加工质量的重要因素^[6]。因此,众多学者研究了机器人关节刚度辨识、刚度评价模型建立,并通过改变机器人加工姿态等方式提高机器人刚度。CVITANIC 等^[7]研究了铣削机器人刚度特性对加工质量的影响,在全空间内进行刚度辨识,使用静态和动态刚度模型优化机器人加工姿态。CHEN 等^[8]分析了机器人末端执行器外加载荷与对应变形之间的映射关系,在综合刚度指标的基础上衍生出表面法向刚度性能评价指标,并将其用于评价机器人加工表面法向的机器人刚度,在刀具进给方向上优化机器人位姿。XIONG 等^[9]针对铣削路径上的机器人位姿优化问题,考虑关节限制、奇异性和轨迹平滑度的约束,采用离散化搜索算法优化机器人位姿以提高加工精度。

收稿日期:2024-07-23

基金项目:装备预先研究共用技术项目(920722MS)

TAN 等^[10]针对机器人低刚度引起的变形误差,同时优化刀具位姿和冗余角度,提高了机器人铣削加工的精度。LIAO 等^[11]提出同时优化机器人与工件位姿的方法,建立考虑旋转变形的刚度指数模型,通过聚类与贪婪算法求解了满足刚度要求的机器人与工件姿态的最小调整次数,在提高机器人铣削刚度的同时,可减少机器人与工件姿态变换次数。BU 等^[12]为提高机器人钻孔的轴向精度,提出在笛卡儿空间中描述机器人末端执行器轴向刚度的笛卡儿刚度模型,通过优化冗余角和施加轴向压力提高钻削稳定性。综上所述,现有研究集中于机器人全空间辨识关节刚度,通过调整机器人姿态来优化加工位姿。对于特定高度的大型筒件铣削,现有方法没有考虑铣削平面内的刚度分布,这导致在机器人刚度不足的位置,优化后的机器人冗余角仍不足以全面提高机器人刚度。同时,在全空间拟合关节刚度会降低加工平面内刚度表征的准确性。因此,面向大型工件特定高度铣削需求时,为提高加工精度,亟需开展考虑冗余角的铣削平面内刚度最优位姿求解优化。

本文在现有研究基础上,聚焦实际铣削加工平面内的机器人铣削系统刚度性能分析。首先建立铣削机器人静刚度模型,通过关节刚度辨识实验获取关节参数,并结合刚度评价指标分析机器人工作平面内的刚度分布。然后考虑机器人加工冗余特性,求解机器人刚度最优位姿。最后设计末端静态加载试验和铣削试验,验证刚度最优位姿求解算法的有效性。

1 机器人运动学建模

1.1 机器人正运动学分析

机器人运动学分析描述机器人各构件的相对运动关系,是建立机器人刚度模型的前提^[13]。本文研究对象为末端安装有执行器的 KUKA KR360 机器人。采用 Modified Denavit-Hartenberg(MD-H)法^[14]定义机器人铣削系统各连杆的坐标系,构建的运动学模型如图 1 所示,各连杆 MD-H 参数如表 1 所示,其中, a 为连杆长度; α 为关节扭角; d 为关节偏移; θ 为关节转角,下标为连杆号。

齐次变换矩阵描述末端坐标系在机器人基坐标系下的位置与姿态,根据表 1 的连杆参数和 MD-H 建模方法,建立相邻两坐标系之间的位姿齐次变换矩阵:

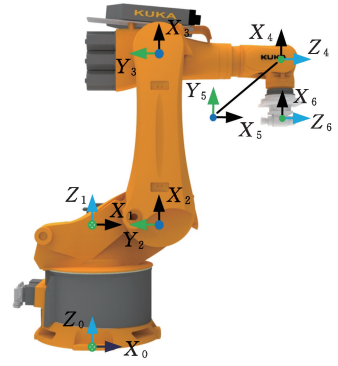


图 1 KUKA KR360 运动学模型

Fig.1 Kinematics model of the KUKA KR360 robot

表 1 KUKA KR360 机器人连杆参数

Tab.1 Link parameters of the KUKA KR360 robot

| 关节 i | a_{i-1}/mm | $\alpha_{i-1}/(^{\circ})$ | d_i/mm | $\theta_i/(^{\circ})$ |
|--------|---------------------|---------------------------|-----------------|-----------------------|
| 1 | 0 | 0 | 1045 | 0 |
| 2 | 500 | 90 | 0 | 90 |
| 3 | 1300 | 0 | 0 | 0 |
| 4 | -55 | 90 | 1025 | 0 |
| 5 | 0 | -90 | 0 | -90 |
| 6 | 0 | -90 | -500 | -90 |

$${}^{i-1}_i\mathbf{T} = \begin{bmatrix} c\theta_i & -s\theta_i & 0 & a_{i-1} \\ s\theta_i c\alpha_{i-1} & c\theta_i c\alpha_{i-1} & -s\alpha_{i-1} & -d_i s\alpha_{i-1} \\ s\theta_i s\alpha_{i-1} & c\theta_i s\alpha_{i-1} & c\alpha_{i-1} & a_i c\alpha_{i-1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中, $c\theta_i$ 表示 $\cos \theta_i$, $s\theta_i$ 表示 $\sin \theta_i$, $c\alpha_{i-1}$ 表示 $\cos \alpha_{i-1}$, $s\alpha_{i-1}$ 表示 $\sin \alpha_{i-1}$ 。

因此机器人六轴法兰坐标系相对于基坐标系的位姿齐次变换矩阵为

$${}^0_6\mathbf{T} = \prod_{i=1}^6 {}^{i-1}_i\mathbf{T} = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: ${}^{i-1}_i\mathbf{T}$ 为第 i ($i = 1, 2, \dots, 6$) 个坐标系到第 $i-1$ 个坐标系的位姿变换矩阵; (n_x, n_y, n_z) 、 (o_x, o_y, o_z) 、 (a_x, a_y, a_z) 分别为机器人法兰坐标系的 X、Y、Z 轴在基坐标系下的姿态; (p_x, p_y, p_z) 为机器人法兰坐标系在基坐标系下的位置。

1.2 雅可比矩阵

机器人运动学雅可比矩阵 \mathbf{J} 描述机器人末端速度和相应关节速度之间的线性关系:

$$\mathbf{v} = \begin{bmatrix} \mathbf{v} \\ \boldsymbol{\omega} \end{bmatrix} = \mathbf{J}(\mathbf{q}_i) \dot{\mathbf{q}}_i \quad (3)$$

其中, \mathbf{v} 为基坐标下的机器人末端广义速度,由末端线速度 \mathbf{v} 和末端角速度 $\boldsymbol{\omega}$ 组成; $\mathbf{J}(\mathbf{q}_i)$ 为关节 i 的雅可比矩阵; \mathbf{q}_i 、 $\dot{\mathbf{q}}_i$ 分别为关节 i 的角度和角速度。

本文基于矢量积法^[15]构建机器人雅可比矩阵,KUKA KR360 机器人的 6 个关节均为旋转关节,机器人相应的第 i 列雅可比矩阵 \mathbf{J}_i 可以表示为

$$\mathbf{J}_i = \begin{bmatrix} \mathbf{u}_i \times ({}^0\mathbf{R}_p) \\ \mathbf{u}_i \end{bmatrix} \quad (4)$$

其中, u_i 为旋转关节 i 的单位旋转轴矢量在基坐标系中的坐标; ${}^iR p_n$ 表示将 p_n 从坐标系 $\{i\}$ 通过旋转变换 R 映射到基坐标系。

根据机器人的正运动学及相应坐标系之间的变换关系可得机器人的雅可比矩阵

$$J = [J_1 \quad J_2 \quad \dots \quad J_6] \quad (5)$$

2 机器人工作空间

机器人的工作空间是指在不发生连杆碰撞干涉的前提下能够到达的空间位置集合。对机器人本体而言,工作空间由其构型及连杆几何参数决定,属于固有属性。对机器人铣削系统而言,加装的执行器扩展了机器人的理论工作空间。通过蒙特卡洛法随机抽取大量不同关节的变量组合,并将其代入正向运动学方程,得到机器人末端参考点的坐标。这些坐标包络的空间就是机器人的工作空间。

2.1 机器人工作空间求解

在 MATLAB 中根据机器人铣削系统的关节角范围限制机器人的关节空间,设置采样点数 $N = 10^4$,调用 plot 函数绘制工作空间散点图,得到机器人铣削系统的三维工作空间,如图 2a 所示。通过 MATLAB 属性检查器获取机器人铣削系统的三维工作空间参数,其中, X、Y 向的运动范围均为 $-3516 \sim 3516$ mm, Z 向运动范围为 $-1120 \sim 4071$ mm。1 轴、5 轴、6 轴的关节角度为 0° , 2 轴、3 轴、4 轴关节角范围分别为 $-110^\circ \sim 40^\circ$ 、 $-54^\circ \sim 190^\circ$ 、 $-350^\circ \sim 350^\circ$,绘制机器人 X-Z 工作平面,如图 2b 所示,其中, X 向运动范围为 $-1651 \sim 3116$ mm, Z 向运动范围为 $-713 \sim 3661$ mm。

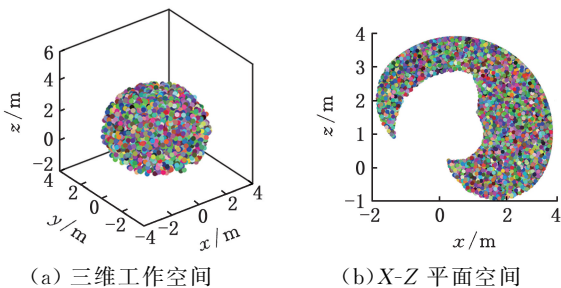


图 2 KUKA KR360 机器人工作空间
Fig.2 Workspace of the KUKA KR360 robot

2.2 机器人工作平面求解

直径 900 mm、500 mm 筒件轴线与机器人底座的高度 H 分别为 1.6 m 和 1.2 m,如图 3 所示。对于既定高度的铣削任务,为求解面向铣削任务的机器人工作空间,首先将工作空间离散化,然后筛选 $z = H$ 的离散点,求得铣削高度为 H 时的机器人工作空间,求解流程如图 4 所示。

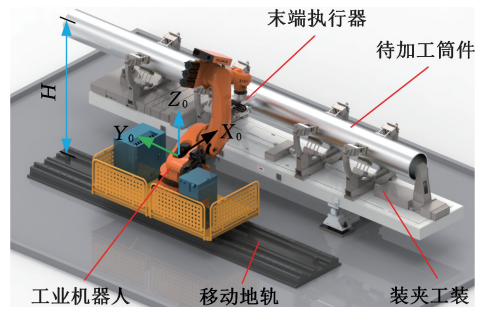


图 3 机器人铣削加工整体布局

Fig.3 The overall layout of robot milling processing

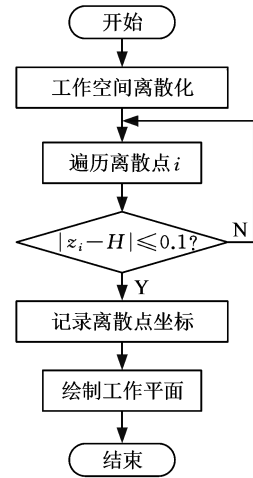


图 4 工作平面求解流程

Fig.4 Progress of solving the working plane

机器人实际铣削工作平面如图 5 所示。该工作平面为圆环,内环直径 497 mm,外环直径 3263 mm。后续最大刚度位姿的寻优工作将基于实际工作平面展开。

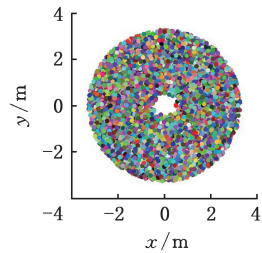


图 5 实际工作平面
Fig.5 The actual working plane

3 机器人关节刚度辨识

3.1 关节刚度辨识原理

机器人执行铣削加工任务时,刀具与工件表面会因材料去除产生铣削力及力矩,为确保受力平衡,机器人关节伺服系统需输出相应的关节力及力矩。本文将连杆视为刚体,则机器人末端变形由各关节变形耦合而成。铣削过程中,机器人铣削力为高频、周期性变化的载荷,为辨识关节刚度,将机器人在加工时所受外力简化为静载荷。准静态假设下,机器人的动力学方程可简化为

$$F = KX \quad (6)$$

式中： F 为末端力矢量； K 为笛卡儿刚度矩阵； X 为末端线性变形矢量。

由广义胡克定律可知，在机器人转角空间中关节力矩与关节扭转变形之间存在线性关系：

$$\tau = K_\theta \theta \quad (7)$$

式中： τ 为关节力矩； K_θ 为关节刚度矩阵； θ 为关节扭转变形矢量。

基于广义胡克定律和虚位移原理可得机器人关节刚度矩阵与笛卡儿刚度矩阵的映射关系，即机器人静刚度模型：

$$K = J^{-T} K_\theta J^{-1} \quad (8)$$

由式(8)可以看出，机器人的笛卡儿刚度矩阵 K 与雅可比矩阵 J 有关，因此机器人末端刚度会随机器人位姿的变化而变化，具有位姿依赖性。

将式(8)代入式(6)，通过变形处理得到机器人关节刚度辨识模型：

$$X = JK_\theta^{-1} J^T F \quad (9)$$

分离关节柔度 K_θ^{-1} 并对式(9)右侧化简，可得

$$X = A(J, F) K_\theta^{-1} \quad (10)$$

式中： A 为雅可比矩阵 J 、力矢量矩阵 F 组成的系数矩阵。

系数矩阵 A 的具体构成如下：

$$A = \sum_{i=1}^6 J_{i1} F_i \begin{bmatrix} J_{11} & J_{12} & \cdots & J_{16} \\ J_{21} & J_{22} & \cdots & J_{26} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ J_{61} & J_{62} & \cdots & J_{66} \end{bmatrix} \quad (11)$$

式中： F_i 为第 i 关节的力； J_{ij} ($i, j = 1, 2, \dots, 6$) 为雅可比矩阵的子元素。

通过关节刚度辨识实验测量机器人在不同位姿下的力与变形即可求解关节刚度矩阵 K_θ 。

3.2 关节刚度辨识实验

为辨识机器人关节刚度系数，首先标定机器人的基坐标系。为避免坐标变换，需将拟合出的机器人基坐标系设为激光跟踪仪测量坐标系。然后规划机器人的采样点位姿，根据采样点在笛卡儿坐标系中的位置反求关节角组合。之后，将机器人移动到各个采样点的对应位姿，并对机器人末端加载 60 kg。采用激光跟踪仪测量所有采样点对应位姿下的机器人末端变形。最后，将机器人末端加载的力和变形代入式(10)，计算关节刚度。

关节刚度辨识实验系统由 KUKA KR360 机器人、配重装置、六维力传感器及激光跟踪仪组成，关节刚度辨识实验仪器布置如图 6 所示。机器人抵抗扭转变形的能力较强，该特性对关节刚度辨识结果的影响较小，因此本文忽略末端的微小扭转变形，只测量线位移。

为辨识机器人在三维工作空间不同位姿下的

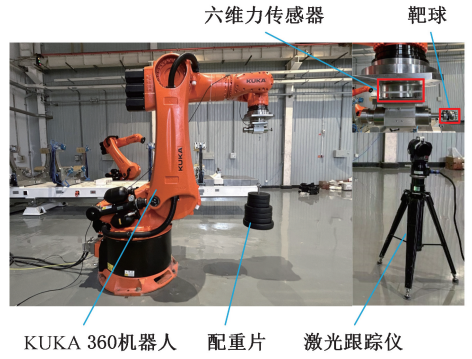


图 6 关节刚度辨识实验系统

Fig.6 Joint stiffness identification experiment system

关节刚度，将边长 600 mm 的立方体区域作为机器人位姿采样空间，相邻采样点的间距为 300 mm，采样点分布如图 7 所示。为辨识机器人铣削平面的关节刚度，将机器人铣削加工平面 ($z = 1.6$ m) 离散，取边长 300 mm 正方形区域的中心为采样点(共计 26 个)，如图 8 所示。

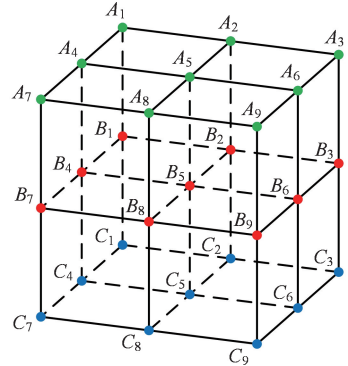


图 7 三维空间采样点分布

Fig.7 Distribution of sampling points in three-dimensional space

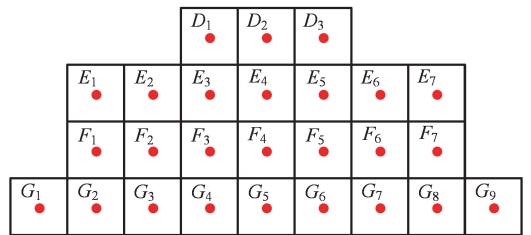


图 8 工作平面采样点分布

Fig.8 Distribution of sampling points on the working plane

采用最小二乘法分别在三维空间和选定工作平面内求解的关节刚度为

$$K_\theta^{3D} = (8.36 \times 10^3, 6.62 \times 10^3, 4.87 \times 10^3, 3.32 \times 10^3, 1.85 \times 10^3, 8.73 \times 10^2) \text{ kN} \cdot \text{m/rad} \quad (12)$$

$$K_\theta^{2D} = (6.89 \times 10^3, 4.53 \times 10^3, 3.40 \times 10^3, 2.13 \times 10^3, 1.27 \times 10^3, 6.32 \times 10^2) \text{ kN} \cdot \text{m/rad} \quad (13)$$

在工作平面选取一点，机器人在该位姿下，基于全空间辨识的关节刚度矩阵计算得到的理论预测变形量为 0.338 mm，基于工作空间辨识的关节

刚度矩阵计算得到的理论预测变形量为 0.335 mm,二者与激光跟踪仪测得的实际变形量 0.325 mm 的相对误差分别为 4.0% 和 3.1%。由此可见全空间的关节刚度拟合会降低加工平面内刚度表征的准确性,面向处于特定空间的铣削任务,在任务空间进行关节刚度辨识能得出更准确的刚度。

4 机器人工作平面内刚度性能分析

笛卡儿刚度矩阵反映机器人整体刚度特性,但难以精准量化不同方向的刚度。因此,引入刚度定向方法,计算沿机器人工具坐标系 3 个方向的刚度。

4.1 刚度评价指标

面向铣削任务的机器人定向刚度椭球如图 9 所示,将刚度椭球投影到加工平面, λ_d, λ_r 为加工平面内的椭圆截面在刚度椭球包络空间中的 2 个半轴长度,它们的物理意义分别为机器人工具坐标系 X 向、Y 向的刚度;垂直于加工平面的半轴长度为 λ_t ,表示机器人工具坐标系 Z 向的刚度。 $\lambda_d, \lambda_r, \lambda_t$ 的平方根表示机器人工具坐标系 3 个方向的刚度。

基于刚度定向方法^[12],机器人沿工具坐标系 X、Y、Z 轴的刚度为

$$\left. \begin{aligned} K_x &= \sqrt{\lambda_d} = 1 / \sqrt{\frac{t_x^2}{\lambda_1^2} + \frac{t_y^2}{\lambda_2^2} + \frac{t_z^2}{\lambda_3^2}} \\ K_y &= \sqrt{\lambda_r} = 1 / \sqrt{\frac{r_x^2}{\lambda_1^2} + \frac{r_y^2}{\lambda_2^2} + \frac{r_z^2}{\lambda_3^2}} \\ K_z &= \sqrt{\lambda_t} = 1 / \sqrt{\frac{e_x^2}{\lambda_1^2} + \frac{e_y^2}{\lambda_2^2} + \frac{e_z^2}{\lambda_3^2}} \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

式中: $(t_x, t_y, t_z), (r_x, r_y, r_z), (e_x, e_y, e_z)$ 分别为 λ_d, λ_r 和 λ_t 在刚度椭球坐标系内的方向向量。

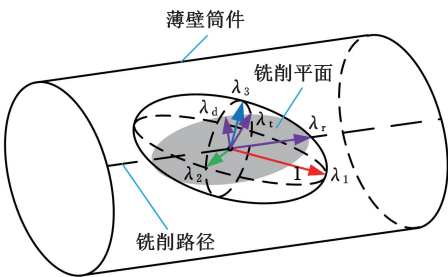


图 9 定向刚度椭球

Fig.9 Directional stiffness ellipsoid

4.2 机器人工作平面内刚度特性分析

铣刀的轴向自由度不能被约束,因此,六自由度机器人具有加工冗余。机器人处于非奇异位姿时,笛卡儿空间内的一个位置点可通过设置不同的冗余角 θ_r 来求解得到适用于同一铣削加工任务的不同加工位姿,不同冗余角的机器人铣削位姿如图 10 所示。

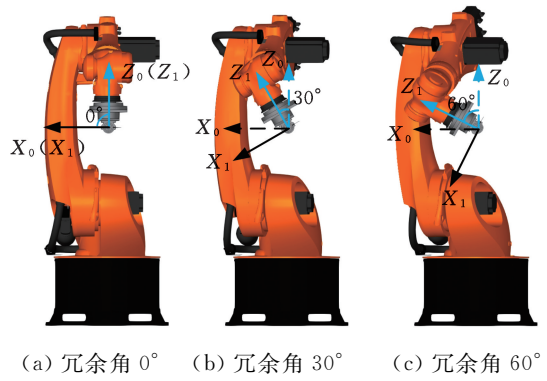


图 10 不同冗余角下的机器人铣削位姿

Fig.10 Robot milling pose at different redundancy angles

根据刚度椭球理论,计算冗余角 $0^\circ, 30^\circ$ 和 60° 时机器人末端的刚度 K_x, K_y 和 K_z ,不同冗余角的机器人刚度在机器人工作平面内的分布如图 11 所示。

由图 11 可知,3 个冗余角下机器人的 X 向刚度均以 $y=0$ 为对称轴呈近似对称分布。其中,对称轴附近区域的 X 向刚度较大,而工作平面上下边缘区域的 X 向刚度较小。机器人 Y 向刚度在工作平面内呈扇形分布,且以 $y=0$ 为对称轴呈近似对称分布。分别提取冗余角 $0^\circ, 30^\circ$ 和 60° 的刚度云图路径数据,得到路径上的机器人 Y 向最大刚度,分别为 93 000.2 N/m、98 000.6 N/m 和 88 000.3 N/m,这表明冗余角较小时能提高机器人 Y 向刚度。另外,从图 11 中可发现,冗余角为 0° 时,机器人 Z 向刚度以 $y=0$ 为对称轴呈近似对称分布,冗余角为 $30^\circ, 60^\circ$ 时,增大冗余角可提高机器人在工作平面内 $y > 0$ 区域的刚度,提取云图内路径上的刚度, 0° 冗余角的 Z 向刚度为 4530.8 N/mm, 30° 冗余角的刚度提高 200.6 N/mm。由此可见,在求解机器人刚度最优铣削位姿时,优化机器人冗余角可有效改善机器人末端刚度。

4.3 刚度最优位姿求解

轴向刚度越大,壁厚越均匀,对粗糙度的减小越有利;进给方向刚度越大,越有利于通过适当提高进给速度提升工作效率。

三向刚度具有强耦合性,不适合用单一方向上的刚度衡量机器人铣削加工性能,故采用综合刚度评价指标^[16]

$$S_i = \sqrt{\lambda_d^2 + \sqrt{\lambda_r^2 + \lambda_t^2}} \quad (15)$$

进行评估。刚度最优位姿算法以求解 S_i 的最大值 $S_{i,max}$ 为目标。在同一位姿下,冗余角的改变会导致刚度变化,因此存在一个使机器人加工性能最佳的刚度最优位姿,考虑冗余角的机器人刚度最优位姿求解流程如图 12 所示。

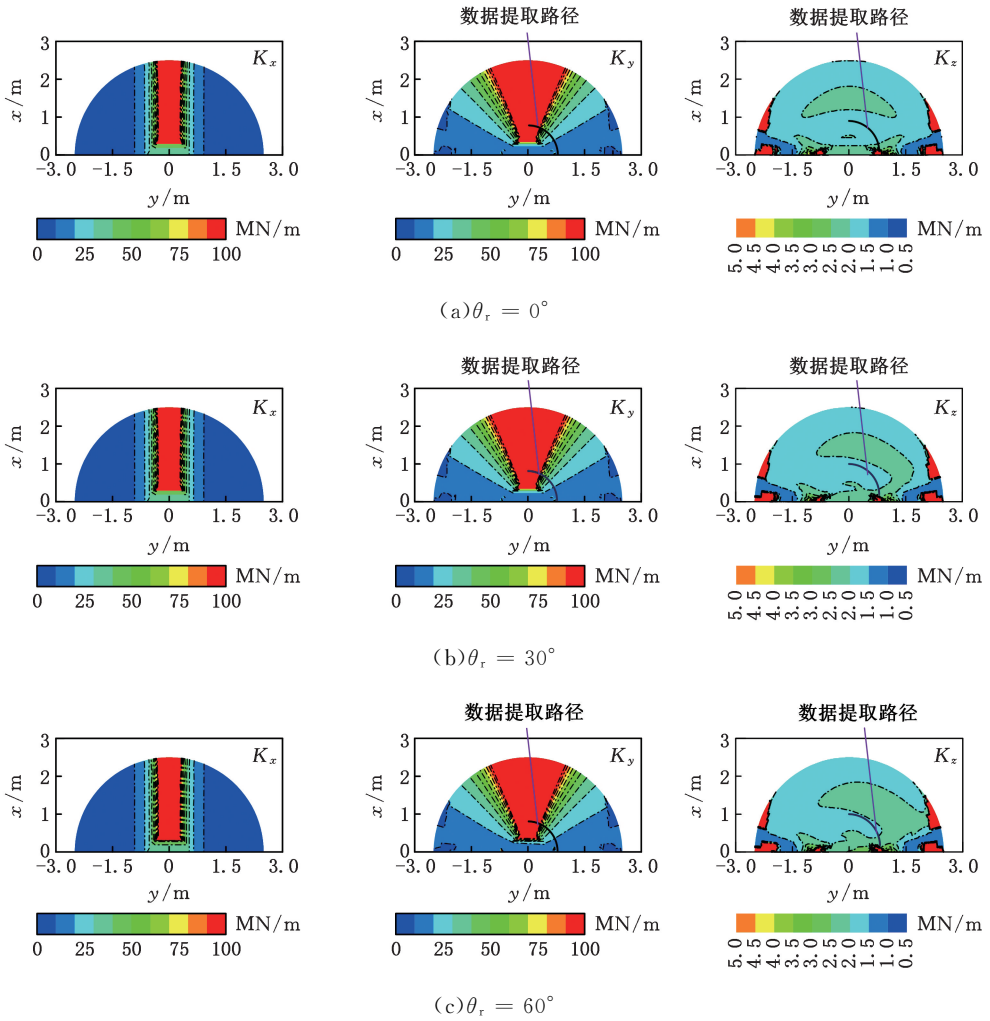


图 11 不同冗余角的机器人定向刚度云图

Fig.11 Directional stiffness contour of the robot at different redundancy angles

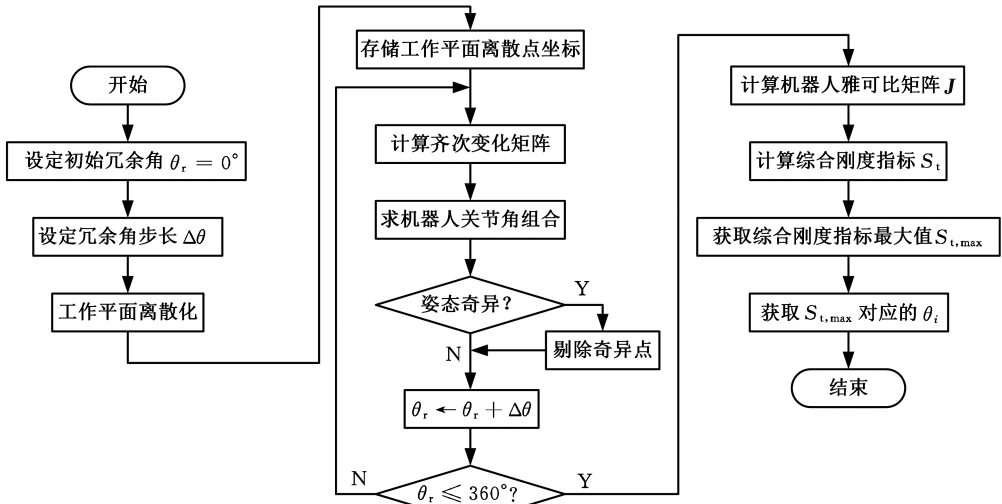


图 12 刚度最优位姿求解流程

Fig.12 The process of solving the optimal pose for stiffness

4.4 结果验证

4.4.1 静态刚度验证实验

针对两种直径的筒件,基于图 12 所示的刚度

最优位姿求解流程分别求解铣削高度 1.6 m 和 1.2 m 的机器人刚度最优位姿。为验证该算法的有效性,每组随机选取 5 个位姿与刚度最优位姿

进行对比。不同铣削高度的位姿关节角分别如表 2、表 3 所示,其中,位姿 1 为刚度最优位姿,位姿 2~6 为随机选取的位姿。

表 2 铣削高度 1.6 m 的机器人各位姿下关节角

Tab.2 The joint angles of the robot in various poses at a milling height of 1.6 m (°)

| 序号 | θ_1 | θ_2 | θ_3 | θ_4 | θ_5 | θ_6 |
|----|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| 1 | 0 | -100.0 | 110.0 | -0.2 | 83.7 | -2.9 |
| 2 | -17.6 | 90.3 | 101.1 | -5.5 | 77.5 | 16.5 |
| 3 | -36.2 | -66.8 | 72.1 | -11.0 | 79.5 | 0 |
| 4 | 11.0 | -55.5 | 53.7 | 7.6 | 90.4 | 0 |
| 5 | 0 | -46.2 | 36.6 | 0 | 99.6 | -90.0 |
| 6 | -30.6 | -78.3 | 87.6 | 0 | 80.8 | 30.6 |

表 3 铣削高度 1.2 m 的机器人各位姿下关节角

Tab.3 The joint angles of the robot in various poses at a milling height of 1.2 m (°)

| 序号 | θ_1 | θ_2 | θ_3 | θ_4 | θ_5 | θ_6 |
|----|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| 1 | 134.4 | -95.6 | 120.6 | -5.0 | 60.7 | -8.7 |
| 2 | 142.7 | -87.1 | 116.6 | 0.7 | 61.6 | -3.3 |
| 3 | 141.8 | -74.2 | 101.8 | 14.8 | 63.0 | -4.7 |
| 4 | 127.1 | -65.6 | 89.2 | -20.0 | 65.9 | 1.8 |
| 5 | 135.3 | -75.8 | 103.6 | -12.0 | 64.6 | 11.1 |
| 6 | -137.3 | -50.7 | 62.33 | 0.7 | 79.4 | 1.0 |

控制机器人运动至各个位姿,在负载 60 kg 下进行末端加载实验,重复测量 3 次,取末端综合变形 $\Delta D = \sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2 + (\Delta z)^2}$ 的均值作为最终结果。

由表 4 可以看出,铣削高度 1.6 m、1.2 m 时,求解的位姿 1 综合变形分别为 92 μm 、63 μm ,均比随机位姿的小;相较于铣削高度 1.2 m,铣削高度 1.6 m 的刚度最优位姿的机器人末端变形更大,末端综合变形结果验证了刚度最优位姿求解算法的有效性。

表 4 不同位姿的机器人末端综合变形

Tab.4 The comprehensive deformation of the robot end under different postures μm

| 机器人姿态 | 机器人末端综合变形 | |
|-------|------------|------------|
| | 铣削高度 1.6 m | 铣削高度 1.2 m |
| 1 | 92 | 63 |
| 2 | 213 | 98 |
| 3 | 339 | 414 |
| 4 | 181 | 341 |
| 5 | 389 | 154 |
| 6 | 420 | 481 |

4.4.2 铣削加工试验验证

本文方法旨在解决机器人铣削加工中的变形问题,为充分验证该方法在应对控制末端变形方面的有效性,在铣削高度 1.6 m 下进行实验,选用的加工参数为转速 10 000 r/min、切削深度 0.4 mm、进给速度 360 mm/min。由静态刚度实验可知铣削位姿 6 变形较大,因此仅选取铣削位姿

1~5 进行铣削实验,在每个位姿下铣削 3 次,采用加速度传感器测量铣削过程的机器人关节振动和执行器振动。加速度传感器布置如图 13 所示,铣削完成后采用测厚仪测量工件壁厚。

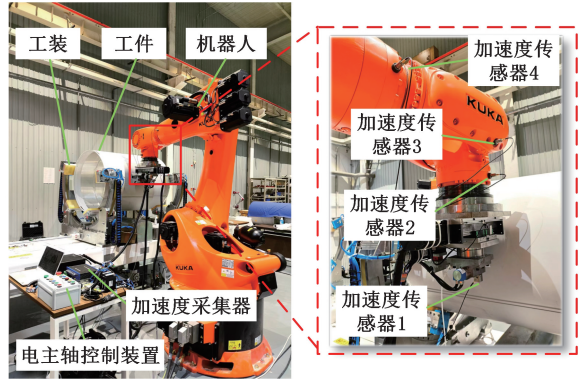


图 13 传感器布置图

Fig.13 Sensor layout diagram

4.4.2.1 铣削振动测量结果分析

机器人在不同位姿铣削加工时,靠近执行器末端的 3 个机器人关节最大振动加速度如图 14 所示,可以看出,机器人处于位姿 1 时,3 个关节的铣削振动加速度最小即机器人位姿 1 的刚度最大,这表明本文算法提高了机器人铣削刚度,有效减小了机器人铣削时各关节的振动。

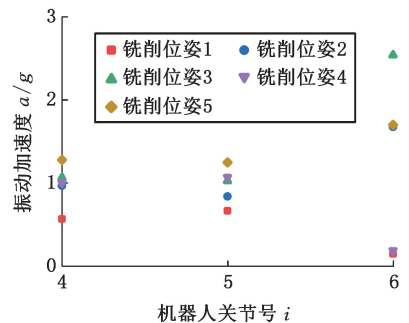


图 14 机器人关节最大振动加速度

Fig.14 Maximum vibration acceleration of robot joint

利用机器人执行器末端的加速度传感器测量切深方向的切削振动,对时域信号进行傅里叶变换得到频域图。由图 15 可以看出,铣削振动能量集中在铣刀切割工件频率 1.5 kHz 和谐波频率 1.9 kHz,执行器的振动主要由铣刀切割工件产生。机器人处于位姿 1 时,执行器振动幅值最小,为 9.02g,比位姿 2 的振动减小 60.88%。提高机器人刚度能减小机器人铣削振动,提高铣削质量。

4.4.2.2 壁厚测量结果

机器人不同位姿下铣削得到的槽如图 16 所示,可以看出,槽 2~槽 5 的铣刀纹理较为明显,其中槽 2 刀纹最为显著,这表明铣削时振动较大。槽 1 的刀纹最浅说明提高机器人刚度、减小执行器振动能有效提高机器人铣削的工件表面质量。

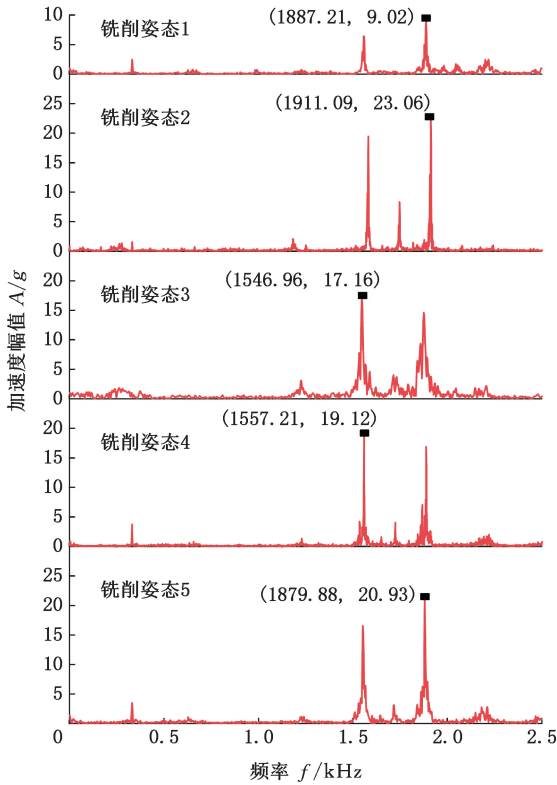


图 15 机器人末端执行器频域分析

Fig.15 Frequency domain analysis of robot end-effector

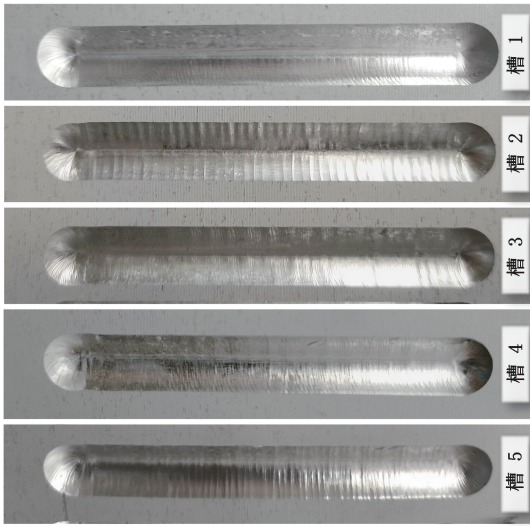


图 16 机器人不同位姿下铣削的槽

Fig.16 Slots obtained by milling under different robot poses

采用测厚仪测量槽的剩余壁厚,等间隔测量 8 个点的壁厚,测量结果如图 17 所示。机器人在位姿 1 时,槽 1 的实际壁厚与理论值 4.68 mm 更接近,最大偏差为 0.04 mm,且波动较小;槽 2 的壁厚波动较大,壁厚波动幅度的最大值为 0.12 mm;槽 3 的壁厚整体偏差较大(与理论值相差 0.06 mm)。位姿 1 铣削得到的槽的壁厚更均匀,这表明通过改变铣削位姿、增大机器人刚度,减小了切深方向振动,有效提高了机器人的切削精度。

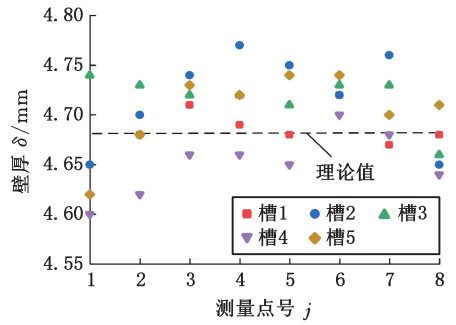


图 17 壁厚测量结果

Fig.17 Wall thickness measurement results

5 结论

1)求解面向铣削任务的机器人工作空间后,在工作空间进行关节刚度辨识实验,发现辨识误差可减小至 3.1%。基于刚度椭球理论研究了机器人冗余角对铣削刚度的影响,发现 30°冗余角的刚度增大了 200.6 N/mm。

2)根据求解的机器人铣削工作空间以及冗余角对机器人末端刚度的影响规律,提出了机器人刚度最优位姿求解算法。铣削高度 1.6 m、1.2 m 的刚度最优位姿下,末端综合变形量最小值分别为 92 μm 和 63 μm,有效增大了机器人末端刚度。

3)随机位姿与最优位姿的铣削试验表明,机器人刚度最优位姿下的铣削振动加速度为 9.02g,振幅最大减小量为 60.88%,壁厚误差为 40 μm,有效提高了机器人铣削精度,并验证了刚度最优位姿求解算法的有效性。

参考文献:

[1] GUO Kai, ZHANG Yiran, SUN Jie. Towards Stable Milling: Principle and Application of Active Contact Robotic Milling [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2022, 182: 103952.

[2] 石龙, 周鹤翔, 李洲龙. 基于模糊线性自抗扰的薄壁件机器人铣削切深控制 [J]. 中国机械工程, 2025, 36(4): 671-680.

SHI Long, ZHOU Hexiang, LI Zhouliong. Depth of Cut Control for Thin-walled Parts in Robotic Milling Based on FLADRC [J]. China Mechanical Engineering, 2025, 36(4): 671-680.

[3] 王涛, 高雪峰, 祝景萍, 等. 机器人纵扭超声铣边颤振在线监测方法 [J]. 航空学报, 2023, 44(13): 427919.

WANG Tao, GAO Xuefeng, ZHU Jingping, et al. Chatter Online Monitoring of Robotic Longitudinal-torsional Ultrasonic Edge Trimming [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2023, 44(13):

- 427919.
- [4] 何雨镛, 谢福贵, 刘辛军, 等. 大型构件机器人原位加工中的测量方案概述[J]. 机械工程学报, 2022, 58(14):1-14.
HE Yuhao, XIE Fugui, LIU Xinjun, et al. Review on Measurement Schemes for Robotic Machining of Large Components In-situ[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022, 58(14):1-14
- [5] 籍永建, 姚利诚. 机器人铣削加工颤振自适应识别方法研究[J]. 中国机械工程, 2023, 34(18):2165-2176.
JI Yongjian, YAO Licheng. Research on Self-adaptive Chatter Recognition Method for Robotic Milling [J]. China Mechanical Engineering, 2023, 34(18): 2165-2176.
- [6] 陈钦韬, 殷参, 张加波, 等. 面向铣削任务的工业机器人刚度位姿优化[J]. 机器人, 2021, 43(1):90-100.
CHEN Qintao, YIN Shen, ZHANG Jiabo, et al. Pose Optimization of Industrial Robots Based on Stiffness for Milling Tasks [J]. Robot, 2021, 43 (1):90-100.
- [7] CVITANIC T, NGUYEN V, MELKOTE S N. PoseOptimization in Robotic Machining Using Static and Dynamic Stiffness Models [J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2020, 66: 101992.
- [8] CHEN Chen, PENG Fangyu, YAN Rong, et al. Stiffness Performance Index Based Posture and Feed Orientation Optimization in Robotic Milling Process [J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2019, 55:29-40.
- [9] XIONG Gang, DING Ye, ZHU Limin. Stiffness-based Pose Optimization of an Industrial Robot for Five-axis Milling[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2019, 55:19-28.
- [10] TAN Shizhong, YANG Jixiang, WU Chengxing, et al. Processing Accuracy Improvement of Robotic Ball-end Milling by Simultaneously Optimizing Tool Orientation and Robotic Redundancy[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2025, 93:102904.
- [11] LIAO Zhaoyang, WANG Qinghui, XIE Hailong, et al. Optimization of Robot Posture and Work-piece Setup in Robotic Milling with Stiffness Threshold [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2022, 27(1):582-593.
- [12] BU Yin, LIAO Wenhe, TIAN Wei, et al. Stiffness Analysis and Optimization in Robotic Drilling Application[J]. Precision Engineering, 2017, 49: 388-400.
- [13] 杨靖, 张小俭, 吴毅, 等. 基于刚度定向的工业机器人铣削姿态优化研究[J]. 中国机械工程, 2022, 33(16):1957-1964.
YANG Jing, ZHANG Xiaojian, WU Yi, et al. Posture Optimization Based on Stiffness Orientation Method for Industrial Robotic Milling[J]. China Mechanical Engineering, 2022, 33(16):1957-1964.
- [14] CRAIG J J. 机器人学导论[M]. 贞超, 王伟, 译. 北京:机械工业出版社, 2018.
CRAIG J J. Introduction to Robotics[M]. Beijing: China Machine Press, 2018.
- [15] WHITNEY D E. The Mathematics of Coordinated Control of Prosthetic Arms and Manipulators[J]. Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 1972, 94(4):303-309.
- [16] CHEN Bing, WANG Yanan, HU Shuhang, et al. A Whole-path Posture Optimization Method of Robotic Grinding Based on Multi-performance Evaluation Indices[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2024, 89:102787.

(编辑 张 洋)

作者简介: 宜亚丽*, 女, 1976年生, 副教授、博士研究生导师。研究方向为机器人加工技术、系统动力学。发表论文40余篇。E-mail: yiyali@ysu.edu.cn.

本文引用格式:

宜亚丽, 程阳洋, 陈晓卫, 等. 基于最大刚度原则的铣削机器人位姿确定方法[J]. 中国机械工程, 2025, 36(7):1544-1552.

YI Yali, CHENG Yangyang, CHEN Xiaowei, et al. A Determining Method for Milling Robot Poses Based on Principles of Maximum Stiffness[J]. China Mechanical Engineering, 2025, 36(7): 1544-1552.