

引文格式: 王震, 郑侃, 董松, 等. 大型复合材料构件机器人铣边站位优化研究[J]. 航空制造技术, 2024, 67(18): 91-99.

WANG Zhen, ZHENG Kan, DONG Song, et al. Optimization of robot milling station for large composite components[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2024, 67(18): 91-99.

大型复合材料构件机器人铣边站位优化研究*

王震, 郑侃, 董松, 孙连军, 王涛

(南京理工大学机械工程学院, 南京 210094)

[摘要] 针对大型复合材料构件机器人铣边站位选取不合理导致加工质量低下的问题, 提出基于最优刚度的单机器人多工位铣边站位优化方法。通过机器人运动学正逆解求得机器人刚度, 建立与机器人站位相关的刚度函数模型。对不同站位下的机器人铣边任务进行分配, 并通过基于刚度的站位优化算法开展机器人铣边站位优化研究, 获得机器人刚度最优的一组站位。机器人铣边试验验证了机器人铣边站位的优化效果。结果表明, 相比优化前, 基于最优刚度的站位优化可显著提升机器人铣边稳定性, 使铣边加工表面粗糙度降低 33% 以上。

关键词: 机器人加工; 站位优化; 移动机器人; 碳纤维增强基复合材料; 大型构件; 刚度性能

Optimization of Robot Milling Station for Large Composite Components

WANG Zhen, ZHENG Kan, DONG Song, SUN Lianjun, WANG Tao

(School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094, China)

[ABSTRACT] Aiming at the problem of low machining quality caused by unreasonable selection of robot milling station for large composite components, a single robot multi-station milling station optimization method based on optimal stiffness is proposed. The stiffness of the robot is obtained by the forward and inverse kinematics of the robot, and the stiffness function model related to the robot position is established. The robot milling tasks at different stations are allocated, and the robot milling station optimization research is carried out through the stiffness-based station optimization algorithm to obtain a set of stations with the best robot stiffness. The optimization effect of robot milling position is verified by robot milling experiment. The results show that the station optimization based on the optimal stiffness can significantly improve the stability of the robot milling edge, and reduces the surface roughness of the milling edge by more than 33% compared with before optimization.

Keywords: Robot machining; Station optimization; Mobile robot; Carbon fiber reinforced matrix composite; Large component; Stiffness performance

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2024.18.091

碳纤维增强基复合材料 (CFRP, 简称复材) 因具有高比强度、高比刚度、耐疲劳、耐腐蚀等优点现已被大量应用于航空工业中^[1-5]。由于复材成型精度较差, 需要后续通过铣边来达到尺寸精度、装配和表面质量要求^[6]。对于大型复材构件的铣边, 其尺寸使得传统机床难以胜任, 因此通常使用机器人进行铣边加工^[7-9]。但机器人

本身的弱刚性导致其加工时容易发生颤振, 铣边质量下降并影响机器人寿命和精度^[10-18]。在多工位铣边大型复材构件时, 工件位置固定, 机器人站位决定了机器人加工时的位姿, 进而决定了机器人铣边时的刚度。因此, 在大型复材构件机器人铣边中, 站位优化对提升机器人刚度、加工质量、加工效率有重要意义。

* 基金项目: 国家自然科学基金 (52075265); 复杂装备系统动力学前沿科学中心科技领军人才团队项目 (FSCCESD220401)。

对于大型构件,通常采用多工位加工和多机器人加工,这两种方式都须对机器人进行合理的任务分配和站位优化,因此许多学者对机器人任务分配做了大量研究。Zhou 等^[19]研究了单机器人路径规划、多机器人任务分配、多工位分配 3 个子问题的求解,并基于此提出了利用遗传算法的嵌套迭代优化方法。于乾坤等^[20]基于约束和关节可用度指标,建立了关于站位的单点和连续喷涂任务代价函数,并结合内点罚函数法构建了最优站位的求解方法。任书楠等^[21]定义了基座可行位置空间,并提出了一种通过基座可行位置空间的交集确定机械臂的停站位置的站位规划方法。陶波等^[22]对移动机器人加工动力学进行了理论建模和实验分析,得到了移动机器人加工的动力学特性,并设计了一种用于恒力匀速磨抛加工的 Takagi-Sugeno (T-S) 模糊控制器。

为综合考虑机器人弱刚性和大型复材构件机器人站位对铣边加工的影响,本文将结合其他学者对机器人刚度的研究成果,建立一种与机器人站位相关的刚度指标函数,再以刚度指标和空间可达性为依据进行机器人铣边任务分配,并以此为基础利用站位优化算法对机器人的站位进行优化计算。最后搭建机器人铣边平台,开展相关试验以验证站位优化对铣边质量的影响。

1 机器人运动学和刚度模型

1.1 机器人运动学模型

为计算机器人末端刚度,使用标准 Denavit-Hartenberg (D-H) 参数法建立机器人运动学模型,构建机器人运动学逆解的求解方法。KUKAKR500 机器人为六自由度关节型机器人,加工范围为 1200~2830 mm,运动关节为回转型,对此机器人进行标准 D-H 参数建模^[23]。按照标准 D-H 参数法建立机器人各连杆坐标系,如图 1 所示,并确定机器人各连杆参数,如表 1 所示。

在标准 D-H 参数机器人模型中的关节坐标变换矩阵^[23-24]为

$$A_i = \text{Rot}_{z,\theta_i} \text{Trans}_{z,d_i} \text{Trans}_{x,a_i} \text{Rot}_{x,\alpha_i} \quad (1)$$

式中, Rot 为坐标旋转矩阵; Trans 为坐标平移矩阵; z 和 x 为旋转轴; θ 为关节转角; a 为连杆长度; α 为连杆扭转角; d 为连杆偏距。

$$A_i = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i \cos \alpha_i & \sin \theta_i \sin \alpha_i & a_i \cos \theta_i \\ \sin \theta_i & \cos \theta_i \cos \alpha_i & -\cos \theta_i \sin \alpha_i & a_i \sin \theta_i \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

对每个关节坐标系进行连续变换可以得到从基座标到末端坐标的坐标变换公式,即

$$T_6^0 = A_1 A_2 A_3 A_4 A_5 A_6 \quad (3)$$

$$T_6^0 = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中, T_6^0 即为机器人的运动学正解。

由于工位优化为离线优化,无响应时间的要求,且需要考虑机器人的路径规划和任务分配以及路径中每个点位的刚度情况,同时为保证机器人关节角不发生剧烈变化,需要对每个关节角的变化幅度加以约束。根据以上考虑,选择使用数值解求运动学逆解。

设 P_{target} 为机器人末端的目标位姿, θ_{target} 为目标位姿下的机器人关节角且满足

$$g(\theta_{\text{target}}) = P_{\text{target}} - f(\theta_{\text{target}}) = \mathbf{0} \quad (5)$$

设 θ^0 为初始估计值, θ 逐渐逼近 θ_{target} , 则对 $f(\theta)$ 在 θ^0 处进行泰勒展开,可得

$$x = f(\theta) = f(\theta^0) + \left. \frac{\partial f}{\partial \theta} \right|_{\theta^0} (\theta - \theta^0) + o(\theta) \quad (6)$$

式中, θ^0 处的雅可比矩阵 $\left. \frac{\partial f}{\partial \theta} \right|_{\theta^0} = J(\theta^0)$ 。令 $\Delta\theta = \theta - \theta^0$,

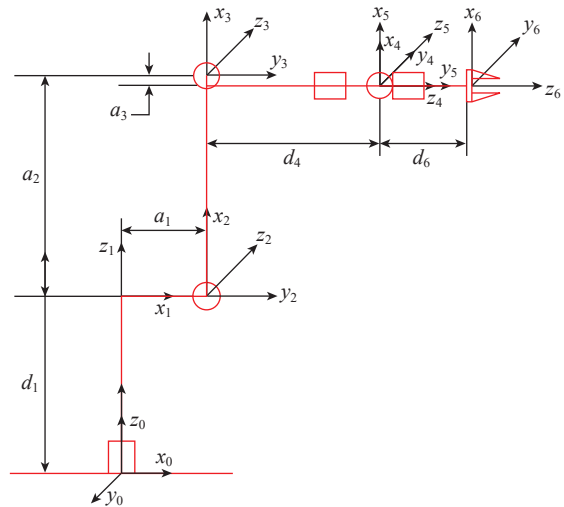


图 1 机器人 D-H 模型

Fig.1 Robot D-H model

表 1 标准 D-H 模型参数

Table 1 Parameters of standard D-H model

关节编号	a_i/mm	$\alpha_i/(\circ)$	d_i/mm	$\theta_i/(\circ)$
1	500	90	1045	0
2	1300	0	0	90
3	55	90	0	0
4	0	90	1025	0
5	0	90	0	0
6	0	0°	290	-180°

保留至第一阶,并假设 $J(\theta^0)$ 可逆,可得

$$\Delta\theta = J^{-1}(\theta^0)[x_{\text{target}} - f(\theta^0)] \quad (7)$$

由 Newton-Raphson 法可得

$$\theta^{k+1} = \theta^k - \left[\frac{\partial g}{\partial \theta}(\theta^k) \right]^{-1} g(\theta^k) \quad (8)$$

令

$$\theta^1 = \theta^0 + \Delta\theta \quad (9)$$

将 θ^1 重新代入并重复上述过程,产生一系列 θ 值 $\{\theta^0, \theta^1, \theta^2, \dots\}$,并最终收敛于 θ_{target} 处,在实际使用中,迭代过程会在满足设定的阈值 ε ,即 $|g(\theta^k) - g(\theta^{k+1})|/|g(\theta^k)| \leq \varepsilon$ 之后停止,将此时的结果作为最终解^[25]。

1.2 机器人刚度模型

对于串联机器人,其刚度模型为

$$\mathbf{K} = \mathbf{J}_\theta^{-T} \mathbf{K}_\theta \mathbf{J}_\theta^{-1} \quad (10)$$

式中, \mathbf{K} 为机器人笛卡儿刚度矩阵; \mathbf{K}_θ 为机器人关节刚度矩阵; \mathbf{J}_θ 为机器人雅可比矩阵。

由于机器人末端所受力矩和实际的扭转变形较小,因此此处只考虑位移变形 d 和末端受力 f 之间的关系。

$$\mathbf{f} = \mathbf{K}_{fd} d \quad (11)$$

假设末端受到大小为一个单位的力作用时,则有

$$d^T \mathbf{K}_{fd}^T \mathbf{K}_{fd} d = 1 \quad (12)$$

式(12)描述的是三维空间中的一个椭球面,其随机器人位姿变化而变化,称为刚度椭球。其物理意义是该椭球面上沿给定方向的轴长反映该方向上的刚度大小,如图2所示。

由于机器人铣削加工时表面质量受多个方向刚度的综合影响,需要选用能够综合反映机器人刚度性能的指标,由于刚度椭球的体积 V 与刚度椭球3个轴长的乘积相关,能够表征机器人的综合刚度性能。

$$V = \frac{4}{3} \pi \lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 = \frac{4}{3} \pi \det(\mathbf{K}_{fd}^T \mathbf{K}_{fd}) \quad (13)$$

因此将刚度性能指标 k_a 确定为

$$k_a = \sqrt[3]{\det(\mathbf{K}_{fd}^T \mathbf{K}_{fd})} \quad (14)$$

1.3 刚度函数

由于工件的几何形状和摆放位置已经确定,机器人原点和工件加工点的相对位置只和机器人在第7轴上

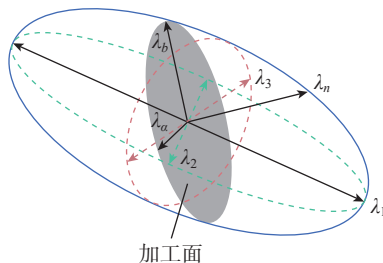


图2 刚度椭球

Fig.2 Stiffness ellipsoid

的位置相关,因此机器人末端位姿 P 、机器人原点在第7轴上的距离 L 、机器人关节角 θ 之间的映射关系为

$$P = f(\theta, L) \quad (15)$$

刚度矩阵与机器人雅可比矩阵相关,可表示为

$$\mathbf{K} = k(\mathbf{J}_\theta) \quad (16)$$

\mathbf{J}_θ 为关于关节角 θ 的函数,若工件上的目标点固定,则刚度指标 k_a 可表示为

$$k_a = h(L) \quad (17)$$

第7轴上的每个机器人站位,即机器人原点至第7轴原点的距离可定义一个集合 $\{X_1, X_2, X_3, \dots, X_n\}$,在 X_n 站位下,机器人刚度指标可表示为

$$k_n = h(X_n) \quad (18)$$

对于每个 X_n ,寻找在其站位下整个工件轮廓中的刚度指标最小的值作为该站位的刚度评价。

$$k_{ni} = k_a(X_n, P_i) \quad (19)$$

$$\tau_n = \min(k_{ni}) \quad (20)$$

2 机器人铣边站位优化

2.1 机器人加工任务分配

对于机器人站位构成的集合 $P\{X_1, X_2, X_3, \dots, X_n\}$ 中的每个元素 X_n ,需要对应的分配加工任务,设 W_i 为工件上的某一点,若 W_i 与 X_n 的距离 L 与机器人加工范围 R 满足

$$\begin{cases} L \leq R_{\min} \\ L \geq R_{\max} \end{cases} \quad (21)$$

则 W_i 被视为该位置下的可加工点。

所有待加工点 $W_i\{X, Y, Z\}$ 构成一个集合 $W\{W_1, W_2, W_3, \dots, W_n\}$, W 也可视为一个 $3 \times m$ 的矩阵 W ,计算该矩阵中所有点到 X_n 站位下机器人原点 O_n 的距离,得到一个距离矩阵 D_n 。

$$D_n = \text{diag}\{[W - O_n(3 \times m)]^T \times [W - O_n(3 \times m)]\} \quad (22)$$

之后判断每个点位是否位于该站位下的可加工范围内。

$$D_n^R = (D_n - R_{\min}^2)(R_{\max}^2 - D_n) \quad (23)$$

之后对 D_n^R 进行逻辑运算,由于判断时只须考虑元素的正负,因此对其作简化,将 D_n^R 中所有负值视为0,所有非负值视为1。矩阵 D_n^R 中的0表示对应的点位无法被加工,1表示可以被加工。对于 P_i 中所有站位 X_n ,分别计算对应的 D_n^R ,并对所有 D_n^R 进行或运算获得逻辑矩阵 Ω 。 Ω 中若存在0值,则 $W\{W_1, W_2, W_3, \dots, W_m\}$ 中存在当前 P_i 中所有站位 X_n 下都无法加工的点,即该站位组合 P_i 无法满足可达性要求;当 Ω 中不存在0值时,则 P_i 满足可达性要求,将 P_i 作为可选站位组合,并将每个站位 X_n 下的可达点位保存为 W_n 。

存在某些点 W_i 同时处于多个站位的可达范围内时,

先将其搁置,待其他点位处理完毕后,需要对其进行如下判断以确定该点位所属的加工站位:

- (1) 选择一个距离已分配点位最近的未分配点位;
- (2) 寻找距离该未分配点位最近的已分配点位;
- (3) 将该未分配点位分配至找到的已分配点位所属的站位;

(4) 重复步骤(1)~(3),直至所有点位分配完毕或超出可达范围分配失败。

2.2 优化算法

工位优化的目标是获得使整体刚度最大化的机器人站位。首先,对于 P_i 中的每个站位 X_n ,按照机器人可达性分配在该站位下的所有工件加工点位 W_m ,并将其储存到机器人可加工点位中 $W_{imm} = W_m$,在每个站位都分配完成后检查是否已分配所有工件加工点位,若结果是否为,则对下一个 P_i 进行相同操作,若当前 P_i 都无法满足要求,则令 $n = n + 1$ 并重新生成 P_i ,重复上述计算直至满足要求;之后,对 W_{imm} 中的每个点位求逆解,获得机器人关节角,并计算机器人末端刚度指标,将所有点位 W_{imm} 中的最低刚度作为此站位 X_n 下的刚度,再将所有站位 $\{X_1, X_2, X_3, \dots, X_n\}$ 中的最低刚度作为 P_i 的刚度;最后,以 P_i 的刚度最大为指标进行优化,获得使刚度最大的 P_i 作为最终优化结果。站位优化流程如图3所示。优化过程的伪代码如图4所示。

2.3 站位优化结果

为验证所提优化算法的有效性,对大型工件的轮廓简化模型进行站位优化。首先对工件站位分配进行预处理,将工件轮廓抽象为加工点位的集合,如图5所示,并根据机器人工作空间对其进行站位的可达性判断,筛选出可行的工位组合。机器人的原始站位如图6所示。

在第7轴上间隔0.1 m取一个站位,组成原始的站位空间。在站位空间中,Z轴上的一个点表示一组机器

人站位组合,而工件作为一个二维流形在Z轴方向上叠加。对每个站位上的加工点位进行可达性检验,由此获得初始站位空间和工件加工点位分布,如图7所示。

根据机器人工作空间范围和工件尺寸,筛选出初始站位组合空间中满足机器人空间可达性要求的站位组

```

input:  $W_m$ —加工点位
output:  $P_{best}(X_1, X_2, X_3, \dots, X_n)$ —机器人站位
1. 定义刚度函数 stiffness
2. for  $P_i$  do
3. for  $X_n$  do
4. for  $W_m$  do
5. 执行 2.1 节任务分配算法
6. end for
7. if  $W_{imm} \neq W_m$  do
8. 跳出所有循环并选择下一个  $P_i$  重新计算
9. end if
10. 对于每个  $W_{imm}$ , 求逆解并计算刚度 stiffness
11.  $minstf(X_n) = \min(stiffness(W_{imm}))$ 
12.  $minstf(P_i) = \min(stiffness(X_n))$ 
13. end for
14. 以  $\max(minstf(P_i))$  为目标进行优化计算
15. end for
16.  $P_{best} = \max(stiffness(P_i))$ 
17. return  $P_{best}$ 
    
```

图4 站位优化算法

Fig.4 Station optimization algorithm

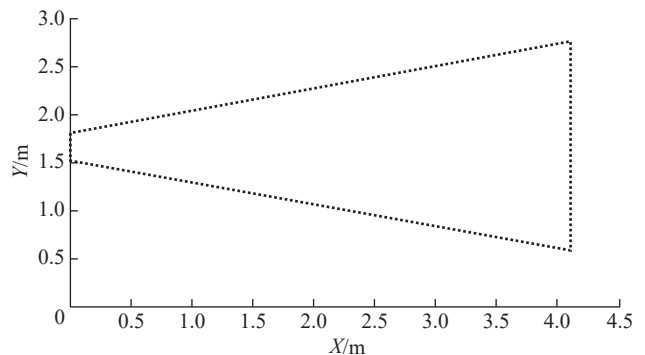


图5 工件轮廓点位

Fig.5 Workpiece contour point position

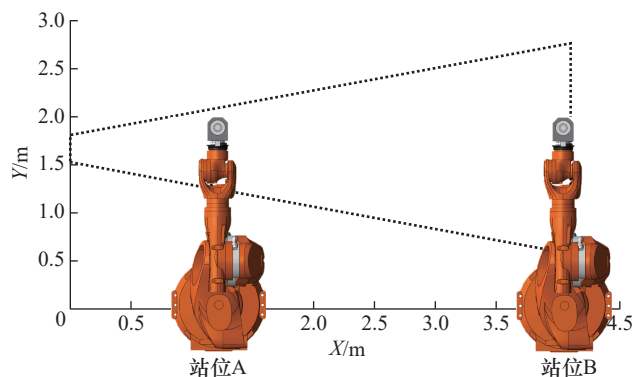


图6 机器人原始站位分配

Fig.6 Robot original station assignment

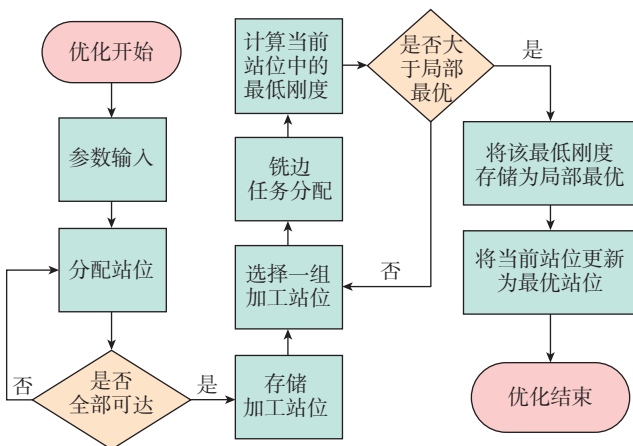


图3 站位优化流程

Fig.3 Station optimization process

合,将其作为可达站位空间,如图8所示。

由可达性筛选出的可行站位组合,并根据由刚度函数计算所得刚度指标进行优化,获得使整体刚度最优的站位组合,如图9所示,站位优化结果为(2.1,3.9),即两个工位中,一个工位位于第7轴上距原点2.1 m处,另一个位于3.9 m处。

进行不同站位的加工任务分配,结果如图10所示。

3 站位优化效果试验

选择3个固定的工件位置,并分别计算优化前和优化后的站位中加工这3个位置时的位姿和刚度情况,

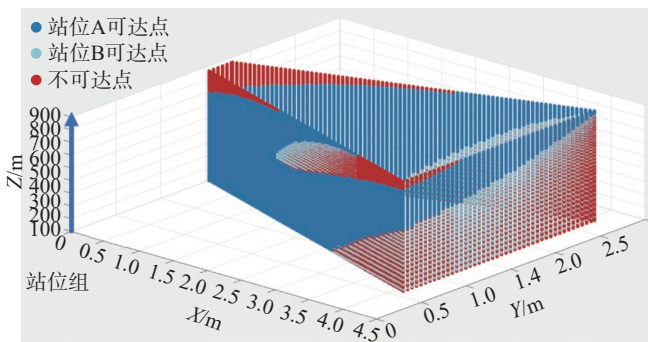
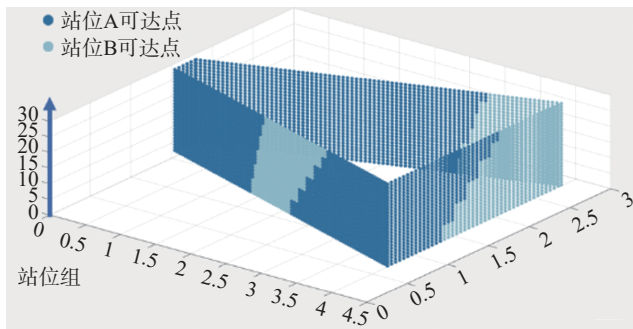
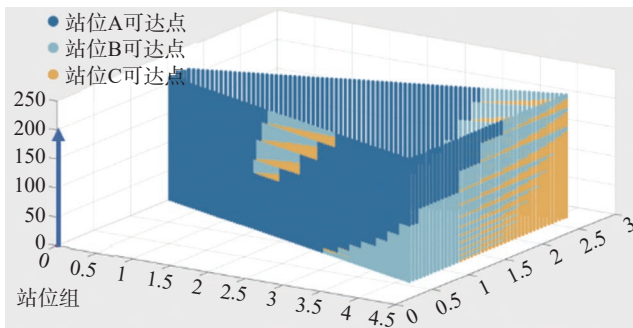


图7 原始站位空间
Fig.7 Original station space



(a) 两工位可达站位空间



(b) 三工位可达站位空间

图8 可达站位空间
Fig.8 Reachable station space

以验证站位优化对机器人加工刚度的改善效果。站位优化后,机器人原点位置改变而工件位置不变,因此机器人铣边时的位姿发生改变,如图11所示。铣边站位优化前后的位姿和刚度如表2所示,与优化前的刚度相比,优化后3个位置的刚度分别提升27.4%、33.0%、26.4%。

为验证实际工况下的优化效果,设计了铣边加工验证试验。加工机器人为KUKA-KR500-R2830机器人,超声加工系统由超声刀柄和超声电源组成。试验中,通过调节超声电源的输出电流来实现超声振幅的调节,铣边刀具为美福D8-PCD两刃立铣刀,工件夹持方式为螺纹装夹,通过M6螺丝将CFRP工件固定于工装台上。机器人内置的末端测力仪为9105-NET-Omega160型六轴力/扭矩传感器(ATI公司),用于测量铣边加工时的铣削力状态。在机器人末端搭载的电主轴上安装PCB-356-A15型三轴加速度传感器,用以测量加工时的机器人状态。本试验所用试件为CFRP薄板件,采用双向交织铺层,铺层角为 90° ,工件尺寸为 $300\text{ mm} \times 400\text{ mm} \times 4\text{ mm}$ 。试验加工现场如图12所示。

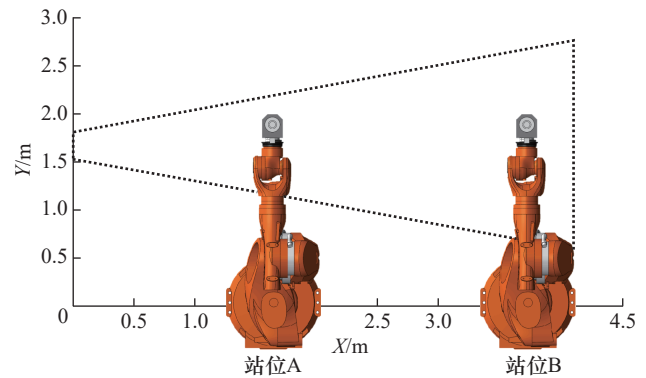


图9 刚度优化站位
Fig.9 Stiffness optimization station

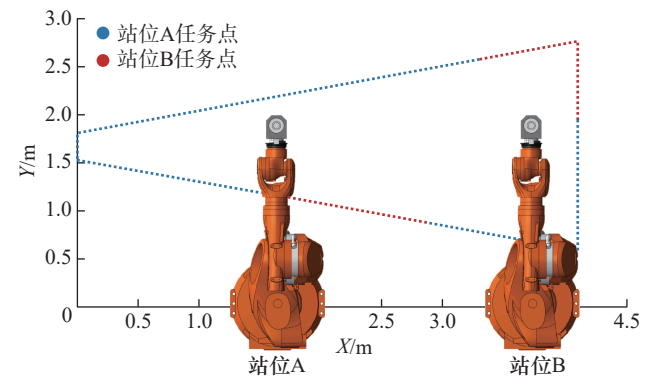


图10 多站位任务分配
Fig.10 Multi-station task allocation

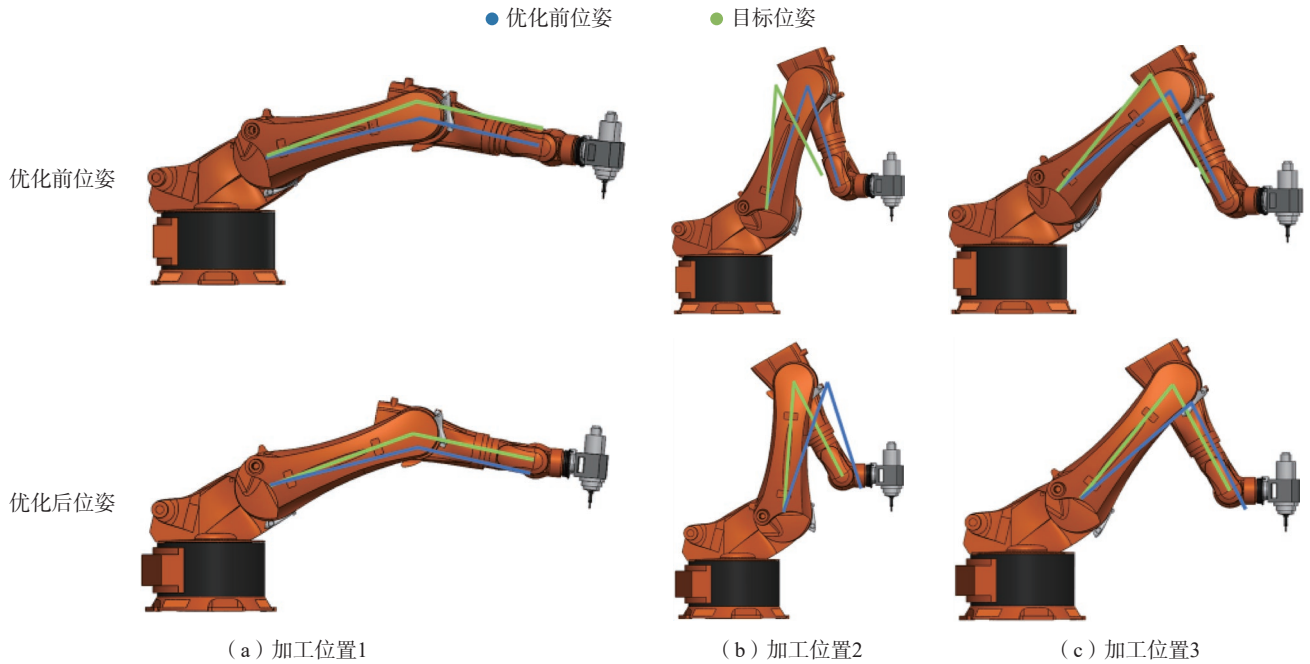


图 11 优化前后位姿

Fig.11 Posture before and after optimization

表 2 机器人的位姿和刚度

Table 2 Robot posture and stiffness

加工位置		$\theta_1/(\circ)$	$\theta_2/(\circ)$	$\theta_3/(\circ)$	$\theta_4/(\circ)$	$\theta_5/(\circ)$	$\theta_6/(\circ)$	$k_d/(10^4 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-1})$
优化前	1	7.2	26.6	45.4	0	-18	0	6.267
	2	16.8	40.4	3.2	0	-46.8	0	5.002
	3	8.6	50.4	-36	0	-75.6	0	6.889
优化后	1	3.6	14.4	54	0	-18	0	7.987
	2	19.6	54	-18	0	-54	0	6.653
	3	9.4	60	-49.2	0	-79.2	0	8.705

对优化前后的机器人加工情况进行试验对比。选取一组普通站位与最优站位进行对比,如图 13 和图 14 所示,在其他加工条件一致的情况下对两种站位下铣边的铣削力和铣边质量进行对比。

机器人铣边加工试验中的位姿信息如表 3 所示。

图 15 和图 16 分别为站位优化前后的铣削力。通过对比可以发现,站位优化前后铣削力由 700 N 降至 500 N 以下,下降约 28.6%,证明站位优化能够减小铣边加工时的铣削力。

利用激光显微镜对 6 个位姿下机器人 CFRP 铣边加工获得的样件进行表面粗糙度的观测,如图 17 所示,获得的结果如图 18 和图 19 所示。试验结果表明,加工站位优化可使加工质量提升 33% 以上,证明所提基于刚度的站位优化能够使机器人加工效果明显提升。

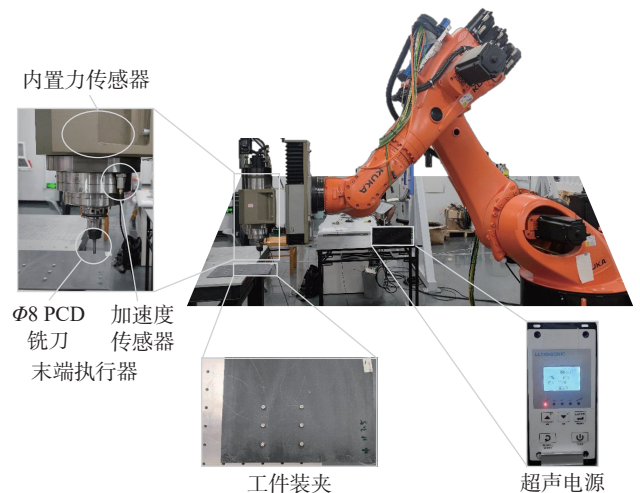


图 12 铣边加工试验设备

Fig.12 Milling edge processing experimental equipment

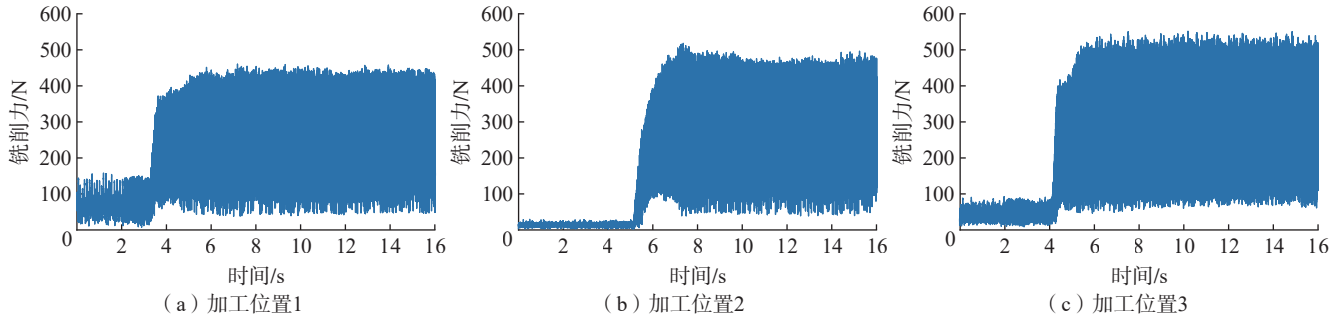


图 16 站位优化后铣削力

Fig.16 Milling force after station optimization

4 结论

提出了一种基于刚度的机器人铣边站位优化方法,该方法可用于机器人铣边加工大型 CFRP 构件。提供了一种基于空间可达性的站位规划方法和一种基于刚度的站位优化方法和任务分配方法,并通过试验验证了方法的有效性,得出结论如下。

(1) 基于机器人静刚度模型建立了一种与机器人站位相关的刚度函数,并基于此函数和空间可达性进行了机器人铣边任务分配。

(2) 通过站位优化改变了机器人铣边时的位姿,使机器铣边时的刚度提升 20% 以上,并通过铣边任务分配算法保证了铣边任务的连续性。

(3) 刚度的改善使铣边加工时的铣削力降低了 28% 以上。刚度的提高和铣削力的降低改善了最终的铣边质量,试验证明,相比优化前,基于刚度的机器人铣边站位优化能够使铣边质量提升 33% 以上。

参考文献

[1] 廖文和, 郑侃, 孙连军, 等. 大型复杂构件机器人加工稳定性研究进展[J]. 航空学报, 2022, 43(1): 156-175.

LIAO Wenhe, ZHENG Kan, SUN Lianjun, et al. Review on chatter stability in robotic machining for large complex components[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2022, 43(1): 156-175.

[2] 董松, 郑侃, 孟丹, 等. 大型复杂构件机器人制孔技术研究进展[J]. 航空学报, 2022, 43(5): 23-40.

DONG Song, ZHENG Kan, MENG Dan, et al. Robotic drilling of large complex components: A review[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2022, 43(5): 23-40.

[3] 王乾杰. 面向大型航空构件装配的异形垫片机器人加工系统设计及实现[D]. 武汉: 华中科技大学, 2020.

WANG Qianjie. Design and implementation of robot machining system for special-shaped gasket for assembly of large aviation components[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2020.

[4] 郝大贤, 王伟, 王琦珑, 等. 复合材料加工领域机器人的应用与发展趋势[J]. 机械工程学报, 2019, 55(3): 1-17.



图 17 样件观测设备

Fig.17 Sample observation equipment

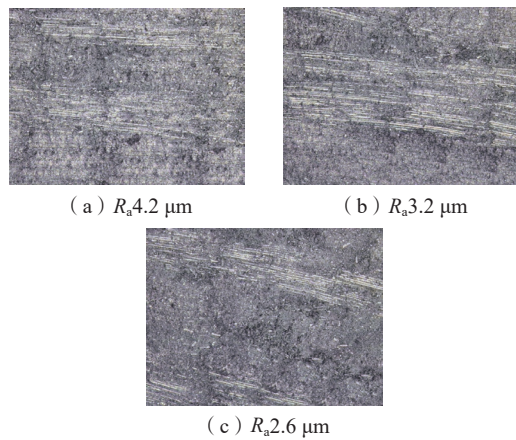


图 18 站位优化前铣边质量

Fig.18 Edge-milling quality before position optimization

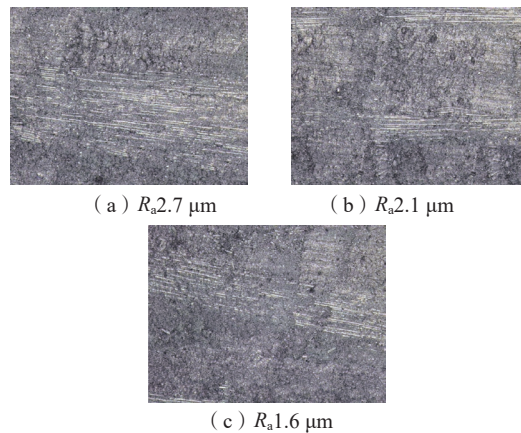


图 19 站位优化后铣边质量

Fig.19 Edge-milling quality after position optimization

- HAO Daxian, WANG Wei, WANG Qilong, et al. Applications and development trend of robotics in composite material process[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(3): 1-17.
- [5] 顾帆. 基于工业机器人的陶瓷基复合材料旋转超声制孔关键技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2020.
- GU Fan. Research on key technology of rotary ultrasonic drilling of ceramic matrix composites based on industrial robot[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2020.
- [6] 于建华, 丁志纯, 雷力明. 复合材料磨削切边关键技术及装置研究[J]. 制造技术与机床, 2017(10): 70-74.
- YU Jianhua, DING Zhichun, LEI Liming. Study on key technology and device of CFRP boundary machining[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2017(10): 70-74.
- [7] 王毅. 大型构件机器人铣孔加工控制系统开发及加工误差分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021.
- WANG Yi. Development of control system for large-scale component robot hole milling and analysis of machining error[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2021.
- [8] 王立凡. 大型薄壁构件镜像加工装备运动控制技术研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2019.
- WANG Lifan. Study on motion control of mirror milling equipment for large thin-walled parts[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2019.
- [9] 郭毅伟. 机器人加工装备研发及在压铸件铣边中的应用[D]. 厦门: 厦门大学, 2018.
- GUO Yiwei. Development of robot processing equipment and its application in milling of die castings[D]. Xiamen: Xiamen University, 2018.
- [10] WANG G F, DONG H Y, GUO Y J, et al. Chatter mechanism and stability analysis of robotic boring[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 91(1): 411-421.
- [11] 倪鹤鹏. 机器人铣削加工轨迹规划与颤振稳定性研究[D]. 济南: 山东大学, 2019.
- NI Hepeng. Research on trajectory planning and flutter stability of robot milling[D]. Jinan: Shandong University, 2019.
- [12] SUN L J, ZHENG K, LIAO W H, et al. Investigation on chatter stability of robotic rotary ultrasonic milling[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2020, 63: 101911.
- [13] 董辉跃, 吴杨宝, 郭英杰, 等. 机器人精镗飞机交点孔的颤振分析与识别[J]. 浙江大学学报(工学版), 2018, 52(8): 1517-1525.
- DONG Huiyue, WU Yangbao, GUO Yingjie, et al. Chatter analysis and identification in robotic fine boring of aircraft intersection holes[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2018, 52(8): 1517-1525.
- [14] 王战玺, 张晓宇, 李飞飞, 等. 机器人加工系统及其切削颤振问题研究进展[J]. 振动与冲击, 2017, 36(14): 147-155, 188.
- WANG Zhanxi, ZHANG Xiaoyu, LI Feifei, et al. Review on the research developments of robot machining systems and cutting chatter behaviors[J]. Journal of Vibration and Shock, 2017, 36(14): 147-155, 188.
- [15] 伍健. 工业机器人不同姿态下的刚度与铣削颤振研究[D]. 长春: 吉林大学, 2020.
- WU Jian. Research on stiffness and milling chatter of industrial robots in different postures[D]. Changchun: Jilin University, 2020.
- [16] NGUYEN V, JOHNSON J, MELKOTE S. Active vibration suppression in robotic milling using optimal control[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2020, 152: 103541.
- [17] PAN Z X, ZHANG H, ZHU Z Q, et al. Chatter analysis of robotic machining process[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2006, 173(3): 301-309.
- [18] GIENKE O, PAN Z X, YUAN L, et al. Mode coupling chatter prediction and avoidance in robotic machining process[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 104(5): 2103-2116.
- [19] ZHOU B, ZHOU R, GAN Y H, et al. Multi-robot multi-station cooperative spot welding task allocation based on stepwise optimization: An industrial case study[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2022, 73: 102197.
- [20] 于乾坤, 王国磊, 任田雨, 等. 一种移动喷涂机器人的高效站位优化方法[J]. 机器人, 2017, 39(2): 249-256.
- YU Qiankun, WANG Guolei, REN Tianyu, et al. An efficient base position optimization method for mobile painting robot[J]. Robot, 2017, 39(2): 249-256.
- [21] 任书楠, 杨向东, 王国磊, 等. 大部件喷涂中的移动机械臂站位规划[J]. 吉林大学学报(工学版), 2016, 46(6): 1995-2002.
- REN Shunan, YANG Xiangdong, WANG Guolei, et al. Base position planning of mobile manipulator for large parts painting[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2016, 46(6): 1995-2002.
- [22] 陶波, 赵兴炜, 丁汉. 大型复杂构件机器人移动加工技术研究[J]. 中国科学(技术科学), 2018, 48(12): 1302-1312.
- TAO Bo, ZHAO Xingwei, DING Han. Study on robotic mobile machining techniques for large complex components[J]. Scientia Sinica (Technologica), 2018, 48(12): 1302-1312.
- [23] 马克 W. 斯庞, 赛斯·哈钦森, M. 维德雅萨加. 机器人建模和控制[M]. 贾振中, 译. 北京: 机械工业出版社, 2016: 40-47.
- SPONG M W, HUTCHINSON S, VODYASAGAR M. Robot modeling and control[M]. JIA Zhenzhong, Trans. Beijing: China Machine Press, 2016: 40-47.
- [24] 约翰 J. 克雷格. 机器人学导论[M]. 贡超, 译. 4 版. 北京: 机械工业出版社, 2006: 53.
- CRAIG J J. Introduction to robotics: Mechanics and control[M]. YUAN Chao, Trans. 4th ed. Beijing: China Machine Press, 2006: 53.
- [25] 凯文 M. 林奇, 朴钟宇. 现代机器人学: 机构、规划与控制[M]. 于靖军, 贾振中, 译. 北京: 机械工业出版社, 2019: 138-140.
- LYNCH K M, PARK F C. Modern robotics: Mechanics, planning and control[M]. YU Jingjun, JIA Zhenzhong, Trans. Beijing: China Machine Press, 2019: 138-140.

通讯作者: 郑侃, 教授, 博士, 研究方向为先进制造。

(责编 青燕)