DOI: 10.3901/JME.2021.07.010

机器人纵振与纵扭超声铣削稳定性对比研究*

郑侃¹ 廖文和¹ 孙连军¹ 刘丽霞² 田威³ 薛枫¹

(1. 南京理工大学机械工程学院 南京 210094;

2. 北京卫星制造厂有限公司 北京 100190;

3. 南京航空航天大学机电学院 南京 210016)

摘要: 针对工业机器人铣削大型航天器舱体支架存在颤振严重导致铣削平面度较低的问题, 提出了机器人纵扭超声铣削新方法。分析了纵扭超声铣削刀尖运动轨迹, 对比分析了机器人一维纵向超声铣削与机器人纵扭超声铣削的稳定域, 并开展了两者的铣削力和铣削表面接刀痕对比试验。计算和试验结果显示: 机器人纵扭超声铣削稳定域较机器人一维纵向超声铣削提升了 46.7%, 各种工况下的铣削力平均降幅达到了 24.7%。同时, 高频扭转振动的介入使得机器人一维纵向超声铣削表面接刀痕高度差降低了 48.7%。上述结论为大型航天器舱体支架的机器人高精高效加工提供了技术基础。

关键词: 机器人加工; 机器人纵扭超声铣削; 机器人铣削稳定性; 接刀痕

中图分类号: TG54

Comparative Study on Stability of Robotic Longitudinal Vibration and Longitudinal-torsional Ultrasonic Milling

ZHENG Kan¹ LIAO Wenhe¹ SUN Lianjun¹ LIU Lixia² TIAN Wei³ XUE Feng¹

(1. School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094;

2. China Academy of Space Technology, Beijing 100190;

3. College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016)

Abstract: Severe chatter caused by industrial robot milling of large spacecraft cabin stents, which results in low process flatness is a knotty problem. Robotic longitudinal-torsional rotary ultrasonic milling (RRUM-LT) is proposed innovatively. Firstly, the tool tip trajectory of RRUM-LT was analyzed. Then RRUM-LT stability domain is solved and compared with robot one-dimensional longitudinal rotary ultrasonic milling (RRUM). Finally, the robotic milling experiments are carried out to contrast the milling forces and the tool marks on the machined surface between two methods. Calculation and experimental results demonstrated that the stability domain of RRUM-LT is improved 46.7% compared with RRUM. And the average reduction of milling force increased 24.7%. Meantime, the addition of high-frequency torsional vibration decreased the tool marks height on the machined surface of RRUM by 48.7%. The above conclusions provide a technical basis for high-precision and high-efficient processing of large spacecraft cabin.

Key words: robotic machining; robotic longitudinal-torsional ultrasonic milling; robotic milling stability; cutter mark

0 前言

从神舟飞船到天宫一号、二号目标飞行器, 逐渐呈现出大尺寸、短周期、高难度等趋势, 对航天

器制造能力提出了新的挑战^[1-2]。特别是航天器舱体外通常安装了大量用于开展在轨技术验证的各类载荷接口, 对平面度的要求极高。由于大型专用数控机床存在加工行程的局限性, 且装配过程中存在多次装调及基准转移误差、装夹误差、复位误差等问题, 机器人铣削加工在航天大型舱体的制造领域备受青睐^[3-6]。诸多学者开展了机器人加工精度补偿,

* 国家自然科学基金资助项目(51861145405, 91860132, 52075265)。20200611 收到初稿, 20201221 收到修改稿

加工工艺等方面的研究^[7-9]。然而, 机器人的柔性导致了其刚性较弱, 在铣削过程中势必会因为动态切削力过大而产生严重的铣削颤振^[10-12], 在每次走刀过程中形成明显的接刀痕, 严重影响了航天器支架载荷安装基准面的平面度。超声加工作为一种复合加工技术, 能有效地降低动态切削力、改善表面质量等, 广泛适用于结构陶瓷、碳纤维等各种难加工材料的加工^[13-14]。因此, 本文将机器人铣削和纵扭超声加工相结合, 提出了机器人纵扭超声铣削加工新方法, 为大型航天器舱体的高精高效加工提供技术支撑。

1 纵扭超声加工运动学分析

1.1 刀尖运动轨迹分析

与单一轴向振动超声铣削刀尖点的运动轨迹不同, 纵扭共振超声铣削的刀尖点的运动轨迹在铣刀的周向附加了高频低幅的扭转振动, 原理如图 1 所示。其优势一部分来自纵振和扭振能量的摄入, 另一部分则归功于刀具运动学规律的变化。因此, 明确纵扭超声振动刀具的运动学规律是开展后续机器人纵扭超声铣削稳定性的前提和基础。根据刀尖三个方向上的运动学规律, 给出了对应的运动学方程, 如式(1)所示。刀尖的运动轨迹如图 2 所示。

图 1 机器人纵扭超声铣削示意图

图 2 机器人纵扭超声铣削刀尖运动轨迹

$$\begin{cases} s_x(t) = r \cos(\omega t) + v_f t \\ s_y(t) = r \sin(\omega t) \\ s_z(t) = h_0 + A \sin(2\pi f_a t) \end{cases} \quad (1)$$

式中, s_x 、 s_y 、 s_z 分别为刀尖点沿着 X 、 Y 、 Z 三个方向的运动方程。这里 r 表示刀具的半径; v_f 表示进给速度(mm/s); h_0 表示切削刃上任意点 P 的起始高度; t 表示切削时间; A 表示刀具的纵振振幅, 单位 μm ; f_a 表示纵向超声振动频率, 单位 Hz。与一维纵向超声铣削不同的是, 在纵扭超声铣削单个超声振动的时间里, 扭转振动使得刀具的角速度发生改变, 其值与刀具本身的切削速度 v_c 和扭转超声振动速度 v_b 有关, 可定义为

$$\omega(t) = \frac{v_c + v_b}{r} \quad (2)$$

扭转超声振动速度 v_b 和纵向超声振动速度 v_a 可以表达为

$$v_a = 2\pi f_a \cdot (A / 1000) \cdot \cos(2\pi f_a t) \quad (3)$$

$$v_b = 2\pi f_b \cdot (B / 1000) \cdot \cos(2\pi f_b t) \quad (4)$$

式中, B 表示扭振振幅, f_b 表示扭振频率。

1.2 刀尖切削速度解析

刀尖切削速度的分析是计算动态切屑厚度和机器人铣削稳定性研究的前提和基础。图 3 为纵扭超声作用下切削刃上任意点 P 的速度矢量图, 包括进给速度、切削速度、纵向超声振动速度和周向扭转振动速度。坐标轴 X_r 表示刀具径向, Y_c 表示切削方向, Z_z 表示刀具轴向。 v_{xr} 和 v_{yc} 是进给速度在坐标轴 X_r 和 Y_c 方向的分解。因为 v_{yc} 远远小于切削速度, 可忽略不计。纵向超声振动使得刀具原来的径向速度 v_{xr} 变成 v_{ar} 。扭转振动使 v_{ar} 发生偏移至 v_{br} 。定义两个角度 α 和 γ 分别用于描述扭转和纵向振动对机器人铣削过程中径向切削速度的变化规律。其中 α 表示纵扭超声铣削径向速度和扭振速度的夹角; γ 表示一维纵向超声铣削径向速度和纵振速度的夹角。根据几何关系, 两者可表示为

$$\alpha = \begin{cases} \arccos \left(\frac{|v_b|}{\sqrt{(v_b)^2 + (v_a)^2 + (v_{xr})^2}} \right) & v_b \leq 0 \\ \pi - \arccos \left(\frac{|v_b|}{\sqrt{(v_b)^2 + (v_a)^2 + (v_{xr})^2}} \right) & v_b > 0 \end{cases} \quad (5)$$

$$\gamma = \begin{cases} \arctan \left| \frac{v_{xr}}{v_a} \right| & v_a \leq 0 \\ \pi - \arctan \left| \frac{v_{xr}}{v_a} \right| & v_a > 0 \end{cases} \quad (6)$$

当 $\alpha=0$ 时, 表示机器人纵扭超声铣削变为机器人一维纵向超声铣削; 当 $\alpha=0$ 且 $\gamma=0$ 时, 表示机器人超声铣削变为机器人铣削。

图3 切削刃上任意点P速度示意图

2 机器人纵扭超声铣削稳定性分析

2.1 动态切屑厚度计算

稳定性解析过程中, 切屑厚度包括静态和动态两种。由于静态切屑厚度不影响铣削稳定域, 因此本文的稳定性解析将其忽略^[16]。在机器人铣削中, 动态切削层厚度是沿着刀具的径向测量的(X_r)。而超声铣削改变了刀具的运动学规律, 动态切削层厚度应沿着切削刃径向切削速度方向测量。假设铣削加工时刀具沿 X , Y , Z 方向的动态位移分别是 Δx , Δy , Δz 。在机器人一维纵向超声铣削过程中, 动态切削层厚度 h_r 沿着 v_{ar} 方向测量, 可以表示为

$$h_r = [\Delta x \cdot \sin(\phi_j) + \Delta y \cdot \cos(\phi_j)] \cdot \sin \gamma - \Delta z \cdot \cos \gamma \quad (7)$$

在机器人纵扭复合超声铣削过程中, 动态切削层厚度 h_c 应沿着 v_{br} 方向测量。因此, 其值可由一维纵向超声铣削动态切削层厚度在 v_{br} 方向投影得到

$$h_c = h_r \cdot \sin \alpha \quad (8)$$

2.2 动态铣削力解析

机器人铣削稳定性解析通常只考虑坐标轴 X 和 Y 两个方向的动态铣削力, 并且其值正比于轴向切深和动态铣削厚度^[16]。然而对于纵扭超声铣削而言, 刀具运动轨迹分布在整个三维空间内。因此, 其沿 Z 轴方向的铣削力不可忽略。由图1可知, 纵扭复合超声铣削过程中轴向切深是随着时间变化的, 其实际的切深可表示为 $b = a_p + As'$, $s' = \sin(2\pi f_a t)$ 。单个切削刃上任意点 P 处的铣削力在三维坐标系下可以表达为

$$\begin{bmatrix} F_{rj} \\ F_{tj} \\ F_{aj} \end{bmatrix} = g(\phi_j) \cdot \begin{bmatrix} K_r \\ K_t \\ K_a \end{bmatrix} \cdot b \cdot h \quad (9)$$

式中, K_r , K_t 和 K_a 分别为径向切削力系数、切向切削力系数和轴向切削力系数; h 表示超声作用下的动态切削层厚度; $g(\phi)$ 表示刀齿是否参与切削。

将式(9)向 X , Y , Z 方向投影可得单个刀齿在三坐标方向的铣削力

$$\begin{bmatrix} F_{xj} \\ F_{yj} \\ F_{zj} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -ss_1s_2 - cc_1 & -c & -sc_2 \\ -s_1s_2c + sc_1 & s & -cc_2 \\ -s_1c_2 & 0 & s_2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} F_{rj} \\ F_{tj} \\ F_{aj} \end{bmatrix} \quad (10)$$

将式(8)和式(9)代入式(10), 并对所有刀齿中的铣削力求和, 可得总铣削力表达式

$$\begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{bmatrix} = a_p \cdot \alpha(t) \cdot \{\Delta r\} + A \cdot \beta(t) \cdot \{\Delta r\} \quad (11)$$

$\alpha(t)$ 和 $\beta(t)$ 均是三阶矩阵, 可具体表达如下

$$\alpha(t) = \begin{bmatrix} \alpha_{xx} & \alpha_{xy} & \alpha_{xz} \\ \alpha_{yx} & \alpha_{yy} & \alpha_{yz} \\ \alpha_{zx} & \alpha_{zy} & \alpha_{zz} \end{bmatrix}$$

$$\beta(t) = \begin{bmatrix} \beta_{xx} & \beta_{xy} & \beta_{xz} \\ \beta_{yx} & \beta_{yy} & \beta_{yz} \\ \beta_{zx} & \beta_{zy} & \beta_{zz} \end{bmatrix}$$

$$\alpha_{xx} = \sum_{j=1}^{N_z} g(\phi_j) \cdot (-ss_1s_2) \cdot [K_r \cdot (ss_1s_2 + cc_1) + K_t \cdot c + K_a \cdot sc_2]$$

$$\alpha_{xy} = \sum_{j=1}^{N_z} g(\phi_j) \cdot (cs_1s_2) \cdot [K_r \cdot (ss_1s_2 + cc_1) + K_t \cdot c + K_a \cdot sc_2]$$

$$\alpha_{xz} = \sum_{j=1}^{N_z} g(\phi_j) \cdot (-s_1c_2) \cdot [K_r \cdot (ss_1s_2 + cc_1) + K_t \cdot c + K_a \cdot sc_2]$$

$$\alpha_{yy} = \sum_{j=1}^{N_z} g(\phi_j) \cdot (cs_1s_2) \cdot [K_r \cdot (-s_1s_2c + sc_1) + K_t \cdot s - K_a \cdot cc_2]$$

$$\alpha_{yz} = \sum_{j=1}^{N_z} g(\phi_j) \cdot (-s_1c_2) \cdot [K_r \cdot (-s_1s_2c + sc_1) + K_t \cdot s - K_a \cdot cc_2]$$

$$\begin{aligned}\alpha_{zx} &= \sum_{j=1}^{N_z} g(\phi_j) \cdot (-ss_1s_2) \cdot [K_r \cdot (-s_1c_2) + K_a \cdot s_2] \\ \alpha_{zy} &= \sum_{j=1}^{N_z} g(\phi_j) \cdot (cs_1s_2) \cdot [K_r \cdot (-s_1c_2) + K_a \cdot s_2] \\ \alpha_{zz} &= \sum_{j=1}^{N_z} g(\phi_j) \cdot (-s_1c_2) \cdot [K_r \cdot (-s_1c_2) + K_a \cdot s_2]\end{aligned}$$

式中, $s=\sin(\phi)$, $c=\cos(\phi)$, $s_l=\sin(\alpha)$, $c_l=\cos(\alpha)$, $s_2=\sin(\gamma)$ 及 $c_2=\cos(\gamma)$ 。 $\alpha(t)$ 和 $\beta(t)$ 满足关系 $\beta(t)=s'\alpha(t)$, $s'=\sin(2\pi f_a t)$ 。

$$\beta_{xx} = \sum_{j=1}^{N_z} g(\phi_j) \cdot (-ss's_2) \cdot [K_r \cdot (ss_1s_2 + cc_1) + K_t \cdot c + K_a \cdot sc_2] \quad (12)$$

2.3 机器人纵扭超声铣削系统模态特性分析

铣削颤振是由加工中的位移反馈引起的, 可以将机器人纵扭超声铣削系统等效成质量-弹簧-阻尼系统建立铣削动力学模型。在机器人铣削中, 可将其动力学方程整理为一个二自由度的延迟微分方程^[17]。通过将该方程拓展至三自由度空间得到机器人纵扭超声铣削动力学方程如下

$$\begin{bmatrix} \ddot{x}(t) \\ \ddot{y}(t) \\ \ddot{z}(t) \end{bmatrix} + \mathbf{H} \begin{bmatrix} \dot{x}(t) \\ \dot{y}(t) \\ \dot{z}(t) \end{bmatrix} + \mathbf{B} \begin{bmatrix} x(t) \\ y(t) \\ z(t) \end{bmatrix} = \mathbf{E} \begin{bmatrix} x(t-\tau) \\ y(t-\tau) \\ z(t-\tau) \end{bmatrix} \quad (13)$$

$\mathbf{H}$, $\mathbf{B}$ 和 $\mathbf{E}$ 均是三阶矩阵, 表示机器人超声铣削系统的模态特性, 可表达为

$$\begin{aligned}\mathbf{H} &= \begin{bmatrix} 2\xi_{nx}\omega_{nx} & 0 & 0 \\ 0 & 2\xi_{ny}\omega_{ny} & 0 \\ 0 & 0 & 2\xi_{nz}\omega_{nz} \end{bmatrix} \\ \mathbf{E} &= \begin{bmatrix} \frac{a_p\alpha_{xxi} + A\beta_{xxi}}{m_{tx}} & \frac{a_p\alpha_{xyi} + A\beta_{xyi}}{m_{tx}} & \frac{a_p\alpha_{xzi} + A\beta_{xzi}}{m_{tx}} \\ \frac{a_p\alpha_{yxi} + A\beta_{yxi}}{m_{ty}} & \frac{a_p\alpha_{yyi} + A\beta_{yyi}}{m_{ty}} & \frac{a_p\alpha_{yzi} + A\beta_{yzi}}{m_{ty}} \\ \frac{a_p\alpha_{zxi} + A\beta_{zxi}}{m_{tz}} & \frac{a_p\alpha_{zyi} + A\beta_{zyi}}{m_{tz}} & \frac{a_p\alpha_{zzi} + A\beta_{zzi}}{m_{tz}} \end{bmatrix} \\ \mathbf{B} &= \begin{bmatrix} \omega_{nx}^2 & & \\ & \omega_{ny}^2 & \\ & & \omega_{nz}^2 \end{bmatrix} + \mathbf{E}\end{aligned}$$

式中, m_{tx} , m_{ty} 和 m_{tz} 是该系统的模态质量; ξ_{nx} , ξ_{ny} 和 ξ_{nz} 是振动系统的阻尼比; ω_{nx} , ω_{ny} 和 ω_{nz} 是振动系统的角频率, 满足 $\omega_n=2\pi f_n$, f_n 表示机器人纵扭超声铣削系统的固有频率。 α_{xxi} 代表 α_{xx} , β_{xxi} 代表 β_{xx} , 以此类推。

2.4 基于半离散法的稳定性解析

现有的稳定性解析方法中, INSERGER 等^[18]

提出半离散法被广泛的用于铣削稳定性叶瓣图的绘制。将式(13)运用 Cauchy 变换可得

$$\dot{\mathbf{u}}(t) = \mathbf{A}_i \mathbf{u}(t) + w_a \mathbf{B}_i \mathbf{u}_{i-m+1} + w_b \mathbf{B}_i \mathbf{u}_{i-m} \quad (14)$$

$$\mathbf{A}_{i(6 \times 6)} = \begin{bmatrix} 0 & \mathbf{I} \\ -\mathbf{H} & -\mathbf{J} \end{bmatrix} \quad \mathbf{B}_{i(6 \times 6)} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \mathbf{L} & 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{u}(t) = [x(t) \ y(t) \ z(t) \ \dot{x}(t) \ \dot{y}(t) \ \dot{z}(t)]^T$$

$$\mathbf{u}_j = \mathbf{u}(t_j) = [x_j \ y_j \ z_j \ \dot{x}_j \ \dot{y}_j \ \dot{z}_j]^T$$

式中, $w_a=w_b=1/2$ 。 $\mathbf{I}$ 表示单位矩阵。参数 m 是半离散法的常数, 可以表示为

$$m = \text{int}\left(\frac{\tau + \Delta t / 2}{\Delta t}\right) \quad (15)$$

根据文献[19]可知: 当时间周期 T 和时间延迟 τ 相等时, 稳定性叶瓣图是唯一确定的。在本文中, $m=k=40$ 。

同样 $\mathbf{u}_{i+1}$ 可以由起始条件 $\mathbf{u}(t_i)=\mathbf{u}_i$ 确定

$$\begin{aligned}\mathbf{u}_{i+1} &= \mathbf{P}_i \mathbf{u}_i + w_a \mathbf{R}_i \mathbf{u}_{i-m+1} + w_b \mathbf{R}_i \mathbf{u}_{i-m} \\ \mathbf{P}_i &= \exp(\mathbf{A}_i \Delta t)\end{aligned} \quad (16)$$

$$\mathbf{R}_i = (\exp(\mathbf{A}_i \Delta t) - \mathbf{I}) \mathbf{A}_i^{-1} \mathbf{B}_i$$

同时一个 $3m+6$ 维的状态矢量可以被定义为

$$\mathbf{z}_i = \text{col}(x_i \ y_i \ z_i \ \dot{x}_i \ \dot{y}_i \ \dot{z}_i \ x_{i-1} \ y_{i-1} \ z_{i-1} \ \cdots \ x_{i-m} \ y_{i-m} \ z_{i-m}) \quad (17)$$

并且, 状态矢量 $\mathbf{z}_{i+1}$ 和 $\mathbf{z}_i$ 满足如下关系

$$\mathbf{z}_{i+1} = \mathbf{D}_i \mathbf{z}_i \quad (18)$$

$\mathbf{D}_i$ 是一个 $3m+6$ 维的系数矩阵

$$\mathbf{D}_i = \begin{bmatrix} \mathbf{P}_D & 0 & \mathbf{R}_{Da} & \mathbf{R}_{Db} \\ \mathbf{G}_{(3 \times 6)} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \mathbf{I} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \mathbf{I} & 0 \end{bmatrix} \quad (19)$$

$$\mathbf{R}_{Da} = w_a \begin{bmatrix} R_{i,11} & R_{i,12} & R_{i,13} \\ R_{i,21} & R_{i,22} & R_{i,23} \\ R_{i,31} & R_{i,32} & R_{i,33} \\ R_{i,41} & R_{i,42} & R_{i,43} \\ R_{i,51} & R_{i,52} & R_{i,53} \\ R_{i,61} & R_{i,62} & R_{i,63} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{R}_{Db} = w_b \begin{bmatrix} R_{i,11} & R_{i,12} & R_{i,13} \\ R_{i,21} & R_{i,22} & R_{i,23} \\ R_{i,31} & R_{i,32} & R_{i,33} \\ R_{i,41} & R_{i,42} & R_{i,43} \\ R_{i,51} & R_{i,52} & R_{i,53} \\ R_{i,61} & R_{i,62} & R_{i,63} \end{bmatrix}$$

$$P_D = \begin{bmatrix} P_{i,11} & P_{i,12} & P_{i,13} & P_{i,14} & P_{i,15} & P_{i,16} \\ P_{i,21} & P_{i,22} & P_{i,23} & P_{i,24} & P_{i,25} & P_{i,26} \\ P_{i,31} & P_{i,32} & P_{i,33} & P_{i,34} & P_{i,35} & P_{i,36} \\ P_{i,41} & P_{i,42} & P_{i,43} & P_{i,44} & P_{i,45} & P_{i,46} \\ P_{i,51} & P_{i,52} & P_{i,53} & P_{i,54} & P_{i,55} & P_{i,56} \\ P_{i,61} & P_{i,62} & P_{i,63} & P_{i,64} & P_{i,65} & P_{i,66} \end{bmatrix}$$

$$G_{(3 \times 6)} = [I \quad 0]$$

由于铣削过程刀具切削周期 τ 呈周期变化, 因此只需在 k 个离散点处对方程进行求解即可。在刀具通过周期 τ 内, 求取 k 个离散时间间隔处的表达式就可以确定铣削系统的稳定性

$$\Phi = D_{k-1} D_{k-2} \cdots D_1 D_0 \quad (20)$$

对于确定的主轴转速和轴向切深, 当矩阵 Φ 的所有特征值的范数均小于 1 时, 机器人纵扭超声铣削系统稳定, 否则为失稳状态。表 1 为机器人超声加工铣削力系数; 表 2 为机器人铣削时的位姿参数, 机器人型号为 KUKA KR210-R2700 EXTRA; 表 3 为绘制叶瓣图时所需的机器人超声铣削系统在三坐标方向上的各阶模态参数。

表 1 机器人超声加工铣削力系数

铣削力系数	数值(RRUM/RRUM-LT)
$K_t / (\text{N} \cdot \text{mm}^{-2})$	626,532
$K_r / (\text{N} \cdot \text{mm}^{-2})$	193,164
$K_a / (\text{N} \cdot \text{mm}^{-2})$	203,172

表 2 机器人铣削位姿参数

坐标系	数值/mm	旋转轴	角度/(°)
X	1 777.41	A	165.5
Y	44.25	B	0
Z	1 547.66	C	180

已知铣削方式为顺铣, 进给速度 30 mm/min, 50%的径向浸入比。超声振动频率 30 kHz, 纵振振幅 A 为 9.3 μm , 扭振振幅 B 为 4.5 μm 。根据上述理论计算过程, 使用 Matlab 软件仿真机器人纵扭超声铣削系统各阶模态下的稳定性叶瓣图, 如图 4 所示。在此基础上, 令扭振振幅为零, 计算得到机器人一维纵向超声铣削稳定性叶瓣图, 如图 5 所示。其中, 图 4 和图 5 中的 2, 3, 4, 5 表示机器人铣削系统对应的第二、第三、第四和第五阶模态。

表 3 机器人 X/Y/Z 方向模态参数

模态阶数	频率/Hz	阻尼(%)	模态质量/kg
1	15,18,10	1.82,1.59,2.28	180.127,125.088,405.285
2	85,81,90	2.01,2.00,2.37	5.609,6.177,5.004
3	165,185,150	2.5,2.34,1.67	1.489,1.184,1.801
4	385,322,452	2.11,2.55,1.90	0.273,0.391,0.198
5	720,675,787	2.22,1.96,2.50	0.083,0.089,0.065

图 4 机器人纵扭超声铣削(RRUM-LT)稳定性叶瓣图

图 5 机器人一维纵向超声铣削(RRUM)稳定性叶瓣图

由于机器人纵扭超声铣削系统一阶模态频率小于 20 Hz, 对主轴转速大于 2 000 r/min 的铣削稳定域未产生影响。因此图 4 和图 5 中仅给出了第二到第五阶模态下的稳定性叶瓣图。其中包络线即为机器人超声铣削的稳定域, 如图 6 所示。其中转速范围在 2 000~2 500 r/min 时, 稳定域改善最为显著,

图 6 机器人超声铣削稳定域对比图

这主要是由于低转速下机器人纵扭超声铣削实现了刀具和工件的周期性分离,有效降低了动态铣削力。采用 Origin 软件中的图形面积识别功能得到两者叶瓣图的包络面积,结果显示:高频扭转振动使得机器人铣削稳定域提高了 46.4%。

3 机器人纵扭超声铣削试验研究

3.1 试验平台

为了进一步验证机器人纵扭超声铣削的优势,

以 KUKA KR210-R2700 EXTRA 机器人为平台,开展了其与机器人一维纵向超声铣削对比试验,如图 7 所示。试验材料为航天器舱体支架所采用的铝合金。超声发生器频率为 30 kHz,分别选取了一维纵向超声刀柄和纵扭超声刀柄,后者通过变幅杆的螺旋槽设计得到了稳定的扭转振幅 $4.5\ \mu\text{m}$ 。通过调节超声电流确保两者轴向振幅均为 $9.3\ \mu\text{m}$ 。试验所用刀具为直径 6 mm 的 4 齿硬质合金立铣刀,切削方式为干切。

图 7 机器人纵扭超声铣削试验平台

3.2 铣削力试验设计与结果分析

选用瑞士 Kistler9119AA2 测力仪对铣削力进行采集,分别得到了不同转速、进给速度以及切深下两种机器人铣削方式的铣削力对比曲线,如图 8 所示。其中 RRUM 代表机器人一维纵向超声铣削,RRUM-LT 代表机器人纵扭超声铣削。

从图 8 中不难看出,机器人纵扭超声的铣削力在各种工况下均小于机器人一维纵向超声铣削。其中不同切深下的降幅效果最为显著,最大达到 33.9%,不同进给速度和不同主轴下的平均降幅也分别达到了 21.7%和 24.8%。因此,高频扭转振动的辅助对于减小机器人铣削力,改善加工稳定性具有重要作用。

(a) 不同主轴转速下的铣削力对比

(b) 不同进给速度下的铣削力对比

(c) 不同轴向切深下的铣削力对比

图 8 不同铣削参数下两种机器人铣削方式的铣削力对比

3.3 铣削表面接刀痕试验设计与结果分析

接刀痕是机器人铣削颤振在加工表面所反映出来的重要表征量。本节主要通过机器人两次走刀形成的加工表面的高度差来分析纵扭超声铣削与一维纵向超声铣削的差异,如图9所示。

试验参数设置如表4所示,采用基恩士激光显

微镜(VK-X100 series)对机器人铣削支架表面接刀痕进行测量。

图9 接刀痕示意图

表4 接刀痕参数表

序号	轴向切深/mm	进给速度/(mm·s ⁻¹)	径向切宽/mm	主轴转速/(r·min ⁻¹)	超声振幅/ μ m
1	0.4	1.2	4	3 000	9.3
2	0.4	1.2	4	3 000	9.3/4.5

接刀痕的检测结果如图10所示。从图中不难发现,因轴向切深较大,机器人一维纵向超声铣削仍存在一定程度的接刀痕,而机器人纵扭超声铣削后的平面较为平整,刀轨交接处只有较为模糊的痕迹,刀痕不明显。各选取了三个位置对接刀痕的数值进行了测量。其中,机器人一维纵向超声铣削的接刀痕最大为8.18 μ m,平均值为6.71 μ m,而机器人纵

扭超声铣削的接刀痕最大值仅为4.22 μ m,平均值为3.44 μ m,降低了48.7%。这主要是由于扭转振动的输入使得机器人铣削力的动态特性发生变化,动态切削层厚度降低,改善了机器人的铣削稳定性,提升了加工精度。同时,该试验结果也验证了第二节理论分析的合理性和准确性。

图10 两种机器人铣削方式下的接刀痕测量结果

4 结论

(1) 机器人纵扭超声铣削可有效改善机器人铣削稳定域,相比机器人一维纵向超声铣削提升了46.4%。

(2) 机器人纵扭超声铣削可有效降低机器人的铣削力,相比机器人一维纵向超声铣削平均降幅达到了24.7%。

(3) 机器人纵扭超声铣削可有效改善机器人铣削精度,相比机器人一维纵向超声铣削,接刀痕的平均高度降低了48.7%。

参 考 文 献

- [1] 马传令,刘勇,陈明,等. CE-4中继卫星使命轨道维持与动量轮卸载联合控制方[J]. 宇航学报, 2020, 41(4): 389-397.
- MA Weiling, LIU Yong, CHEN Ming, et al. A combined

- control method of chang'e-4 re lobey satellite's mission orbit-keeping maneuver and momentum[J]. *Journal of Astronautics*, 2020, 41(4): 389-397.
- [2] 胡瑞钦, 张立建, 孟少华, 等. 基于柔顺控制的航天器大部件机器人装配技术[J]. *机械工程学报*, 2018, 54(11): 85-93.
- HU Ruiqin, ZHANG Lijian, MENG Shaohua, et al. Robotic assembly technology for heavy component of spacecraft based on compliance control[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2018, 54(11): 85-93.
- [3] MOUSAVI S, GAGNOL V, BELHASSEN C, et al. Stability optimization in robotic milling through the control of functional redundancies[J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2018, 50:181-192.
- [4] HE F X, LIU Y, LIU K. A chatter-free path optimization algorithm based on stiffness orientation method for robotic milling[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2019, 101: 2739-2750.
- [5] 林晓青, 杨继之, 乐毅, 等. 一种可移动检测机器人站位规划策略[J]. *宇航学报*, 2018, 39(9): 1031-1038.
- LIN Xiaoqing, YANG Jizhi, YUE Yi, et al. A base position planning strategy for a mobile inspection robot[J]. *Journal of Astronautics*, 2018, 39(9): 1031-1038.
- [6] 刘明爽. 航天器支架机器人铣削系统[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2017.
- LIU Mingshuang. Robotic milling system for machining spacecraft stent[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2017.
- [7] 周星, 黄石峰, 朱志红. 六关节工业机器人 TCP 标定模型研究与算法改进[J]. *机械工程学报*, 2019, 55(11): 186-196.
- ZHOU Xing, HUANG Shifeng, ZHU Zhihong. TCP calibration model research and algorithm improvement of six joint industrial robot[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2019, 55(11): 186-196.
- [8] 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.
- 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.
- [9] XIONG G, LI Z L, DING Y, et al. A closed-loop error compensation method for robotic flank milling[J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2020, 63, 101928.
- [10] CEN L J, MELKOTE S N, CASTLE J, et al. A method for mode coupling chatter detection and suppression in robotic milling[J]. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2018, 140(8): 1-9.
- [11] CORDES M, HINTZE W, ALTINTAS Y. Chatter stability in robotic milling[J]. *Robotics and Computer Integrated Manufacturing*, 2019, 55: 11-18.
- [12] YUAN L, SUN S S, PAN Z G, et al. Mode coupling chatter suppression for robotic machining using semi-active magnetorheological elastomers absorber[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2019, 117: 221-237.
- [13] XU S L, SHIMADA K, MIZUTANI M, et al. Analysis of machinable structures and their wettability of rotary ultrasonic texturing method[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2016, 29(6): 1187-1192.
- [14] ZHAO J, ZHAN J M, ZHU P X, et al. Assessment and optimization for robot ultrasonic polishing[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2000, 36(1): 71-74.
- [15] ALTINTAS Y, BUDAK E. Analytical prediction of stability lobes in milling[J]. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 1995, 44(1): 357-362.
- [16] 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.
- [17] YANG W A, HUANG C, CAI X L, et al. Effective and fast prediction of milling stability using a precise integration-based third-order full-discretization method[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2020, 106: 4477-4498.
- [18] INSERGER T, STEPAN G. Updated semi-discretization method for periodic delay-differential equations with discrete delay[J]. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 2010, 61(1): 117-141.
- [19] ALTINTAS Y. Analytical prediction of three dimensional chatter stability in milling[J]. *JSME International Journal Series C*, 2001, 44(3): 717-723.

作者简介: 郑侃(通信作者), 男, 1983 年出生, 博士, 副教授。主要研究方向为机器人旋转超声加工技术。

E-mail: zhengkan@njust.edu.cn

廖文和, 男, 1965 年出生, 博士, 教授。主要研究方向为航空航天产品的先进制造技术。

E-mail: cnwho@njust.edu.cn

孙连军, 男, 1992 年出生, 博士研究生。主要研究方向为机器人旋转超声铣削稳定性。

E-mail: 18751966256@163.com

刘丽霞, 女, 1975 年出生, 硕士, 研究员。主要研究方向为航天器产品制造工艺、检测技术、可靠性和标准化。

E-mail: zgcyxlxh@163.com

田威, 男, 1977 年出生, 博士, 教授。主要研究方向为航空航天大部件智能制造技术与装备。

E-mail: tw_nj@nuaa.edu.cn

薛枫, 男, 1995 年出生, 博士研究生。主要研究方向为旋转超声加工工艺。

E-mail: imeimeimei@163.com