

doi: 10.12068/j.issn.1005-3026.2019.07.015

# 机器人铣削加工稳定性影响因素

刘宇, 何凤霞

(东北大学 机械工程与自动化学院, 辽宁 沈阳 110819)

**摘要:** 机器人铣削加工时容易发生模态耦合颤振,对刀具和机器人本体造成伤害,从而导致机器人定位精度降低.为了研究机器人铣削加工稳定性的影响因素,进行大量的铣削加工实验,研究主轴转速、轴向切深、进给速度、刀具悬长、顺逆铣以及切削材料等因素对于机器人铣削加工稳定性的影响.结果表明:在一定范围内,主轴转速越低、进给速度越快、轴向切深越大、刀具悬长越短、采用逆铣、材料硬度越大越容易导致模态耦合颤振的发生,且主轴转速和刀具悬长对于模态耦合颤振影响显著.

**关键词:** 机器人铣削;模态耦合颤振;切削参数;刀具悬长;顺逆铣

中图分类号: TP 242.2; V 215.3<sup>+4</sup> 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2019)07-0991-06

## Research on the Influencing Factors of Robot Milling Stability

LIU Yu, HE Feng-xia

(School of Mechanical Engineering & Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China.  
Corresponding author: LIU Yu, E-mail: yuliu@mail.neu.edu.cn)

**Abstract:** The robot milling is prone to modal coupling chatter, which will do damage to the tool and the robot body, resulting in a decrease in the positioning accuracy of the robot. In order to study the influencing factors of robot milling, a large number of experiments were carried out to study the effects of spindle speed, axial depth of cutting, feed rate, tool suspension length, up and down milling, and cutting materials on robot modal coupling chatter. The results showed that in a certain range, the lower the spindle speed, the faster the feed rate, the deeper the cutting depth, the shorter the suspension length, the up-milling, the harder the material, the more likely the modal coupling chatter occurs. The spindle speed and the tool suspension impact significantly on modal coupling chatter.

**Key words:** robot milling; modal coupling chatter; cutting parameter; tool suspension length; up and down milling

颤振是铣削加工中需要避免出现的一种自激振动<sup>[1-3]</sup>,由于机器人的弱刚度<sup>[4]</sup>和非对称性,极易导致机器人铣削加工出现模态耦合颤振.1998年,Gasparetto<sup>[5]</sup>通过铣削木头推导得到模态耦合颤振预测判据.Pan等<sup>[6]</sup>首次提出机器人铣削加工会导致模态耦合颤振的出现,且颤振频率接近于机器人固有频率,提出选择合适的刀具、工作空间、进给方向等来避免颤振的发生.Cen等<sup>[7]</sup>提出将切削力影响附加到模态耦合颤振预测模型中,通过优化选择得到最佳进给速度抑制颤振.Chen等<sup>[8]</sup>应用模糊滑膜控制理论调整进给速度控制切削力.关于机器人铣削加工的研究成果较少,随

着机器人加工应用的发展,学者越来越关注机器人加工应用问题,其中颤振问题是重要研究内容之一<sup>[9-10]</sup>.

Pan等<sup>[6]</sup>研究了机器人铣削加工时顺逆铣对于模态耦合颤振的影响.一些学者论述了主轴转速对于机器人铣削稳定性的影响,认为低转速时发生模态耦合颤振,高转速铣削时以再生颤振为主<sup>[11-12]</sup>.但对于机器人铣削加工时主轴转速、切深、进给速度、刀具悬长以及顺逆铣对模态耦合颤振影响的详细研究以及实验验证还未见发表.

本文通过单一变量控制实验、测力和加速度信号验证不同的加工参数对于模态耦合颤振的影

响,为提高机器人铣削加工应用提供参数优化选择基础。

## 1 切削参数影响实验及分析

搭建机器人铣削实验平台,将额定转速为 60 000 r/min 的电主轴安装在机器人力传感器末端,选用刀具直径为 2 mm 的两刃钨钢铣刀,见图 1。

在机器人铣削加工时,通过 ABB 三轴力传感器和 ABB Test signal viewer 软件采集 3 个方向力信号。通过 PCB 三轴加速度传感器 356A24,3560-B 数据采集系统和 Pulse 分析软件得到加工频谱图,对比分析振动特征。



图 1 机器人铣削实验装置

Fig. 1 Robot milling experimental devices

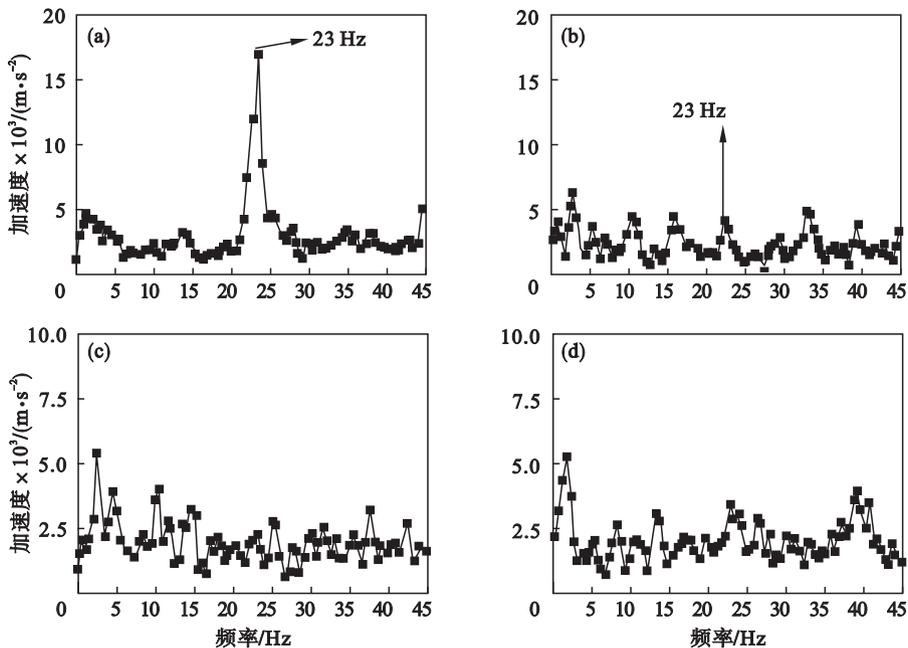


图 3 不同主轴转速下加速度信号频谱图

Fig. 3 Acceleration signal spectrum under different spindle speeds

(a)—9 000 r/min; (b)—12 000 r/min; (c)—15 000 r/min; (d)—18 000 r/min.

### 1.2 轴向切深对模态耦合颤振的影响

实验采用主轴转速 18 000 r/min,进给速度

### 1.1 主轴转速对模态耦合颤振的影响

实验采用进给速度 15 mm/min,轴向切深 0.10 mm,主轴转速分别为 9 000, 12 000, 15 000, 18 000 r/min,加工过程中采集的切削力如图 2 所示。

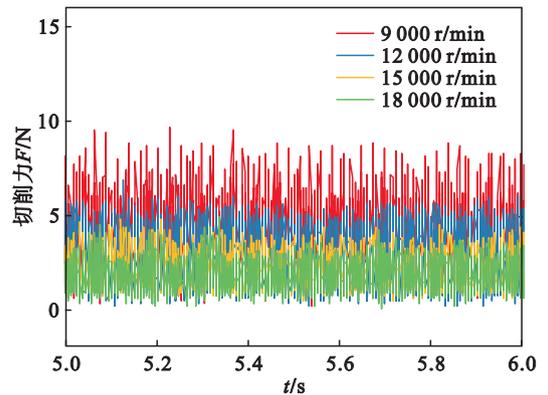


图 2 不同主轴转速切削力

Fig. 2 Cutting forces under different spindle speeds

当以 9 000 r/min 的主轴转速切削时,平均切削力为 4.322 N; 主轴转速 12 000 r/min 时,平均切削力为 3.070 N,减少了 28.97%; 主轴转速 15 000 r/min 时,平均切削力为 2.318 N,减少了 20.32%; 主轴转速 18 000 r/min 时,平均切削力为 2.042 N,减少了 11.91%。铣削过程中采集到的机器人加速度信号如图 3 所示。

15 mm/min,轴向切深分别为 0.05, 0.10, 0.15, 0.20 mm,加工过程中采集的切削力如图 4 所示。

15 mm/min,轴向切深分别为 0.05, 0.10, 0.15, 0.20 mm,加工过程中采集的切削力如图 4 所示。

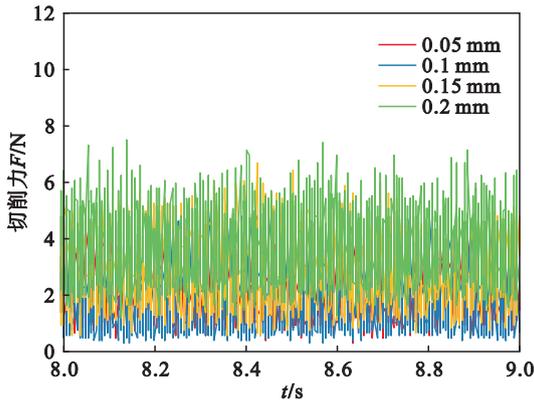


图 4 不同轴向切深下的切削力

Fig. 4 Cutting forces under different axial depths

轴向切深为 0.05 mm 时,平均切削力为 2.318 N;轴向切深为 0.1 mm 时,平均切削力为 2.480 N,增加了 6.99%;轴向切深为 0.15 mm 时,平均切削力为 3.123 N,增加了 25.93%;轴向切深为 0.2 mm 时,平均切削力为 3.730 N,增加了 19.44% .

总体来看,轴向切深增加,切削力增加. 铣削过程中采集到的机器人加速度信号如图 5 所示.

从不同轴向切深下的加速度频谱看出,轴向切深为 0.2 mm 时,在机器人固有频率处出现明显峰值,证明发生了模态耦合颤振. 轴向切深为 0.15 mm 时,在机器人固有频率处也出现了峰值,

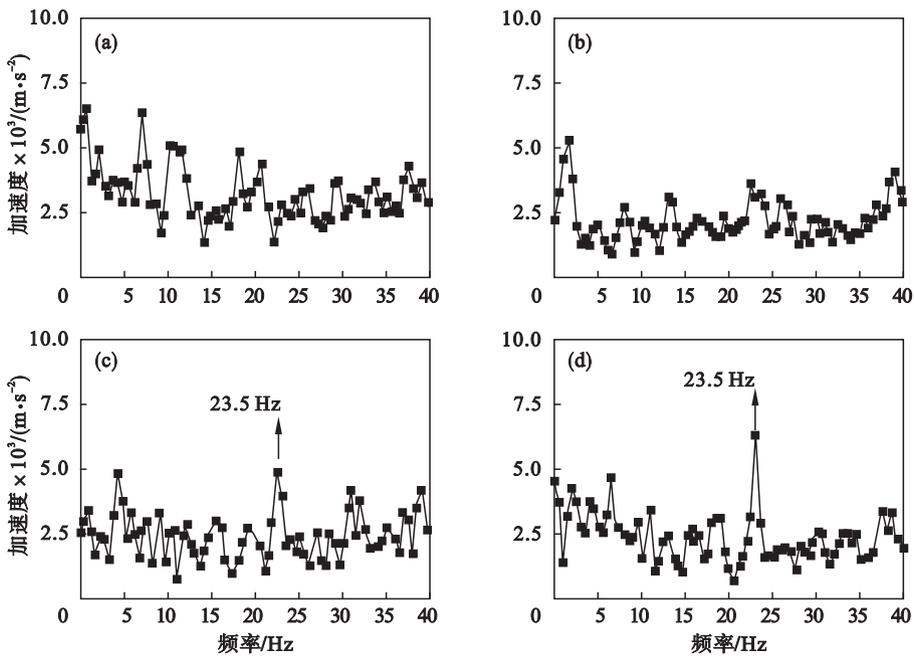


图 5 不同轴向切深下加速度信号频谱图

Fig. 5 Acceleration signal spectrum under different axial depths

(a)—0.05 mm ;(b)—0.1 mm ;(c)—0.15 mm ;(d)—0.2 mm.

不过此处的峰值小于切深为 0.2 mm 时,其他切深下该峰值不明显. 因此,当轴向切深越大时,越容易发生模态耦合颤振,其颤振频率与机器人低阶固有频率接近.

### 1.3 进给速度对模态耦合颤振的影响

采用主轴转速 18 000 r/min, 轴向切深 0.10 mm,进给速度分别为 15,30,45,60 mm/min,加工过程中采集的切削力如图 6 所示.

进给速度为 15 mm/min 时,平均切削力为 2.318 N;进给速度 30 mm/min 时,平均切削力为 3.850 N,增加了 66.09%;进给速度 45 mm/min 时,平均切削力为 4.378 N,增加了 13.71%;进给速度 60 mm/min 时,平均切削力为 5.052 N,增加了 15.40% .

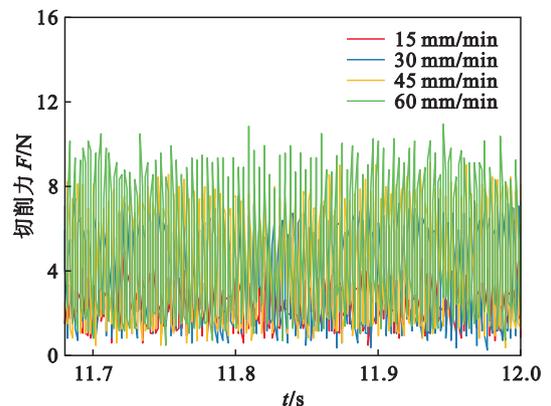


图 6 不同进给速度下的切削力

Fig. 6 Cutting forces under different feed rates

总体来看,进给速度增加,切削力增加. 相应的铣削过程中采集到的机器人加速度信号如图 7

所示。

进给速度 60 mm/min 时,在机器人固有频率处出现了明显峰值,证明发生了模态耦合颤振. 进给

速度 45 mm/min 时,在机器人固有频率处也出现了峰值,其他进给速度下该峰值不明显. 因此,当进给速度越大时,越容易发生模态耦合颤振.

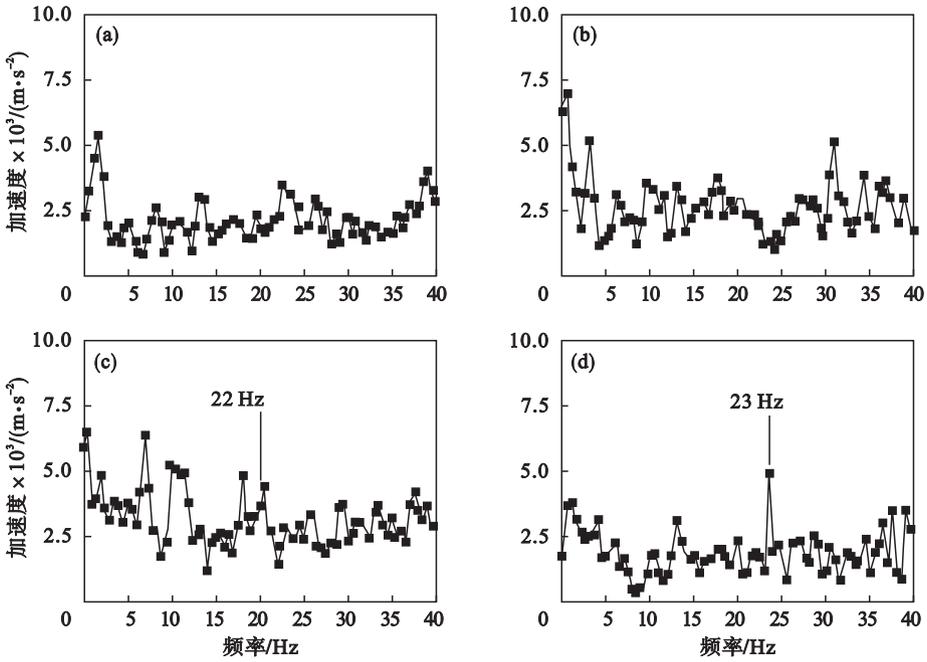


图 7 不同进给速度下加速度频谱图

Fig. 7 Acceleration signal spectrum under different feed rates

(a)—15 mm/min; (b)—30 mm/min; (c)—45 mm/min; (d)—60 mm/min.

### 2 刀具悬长对模态耦合颤振的影响

采用主轴转速 9 000 r/min, 进给速度 15 mm/min, 轴向切深 0.1 mm, 全槽铣削 Al6061, 刀具悬长分别为 20, 25 和 30 mm. 三种情况下的切削力和加速度信号如图 8 和图 9 所示.

刀具悬长为 20 mm 时, 平均切削力为 4.327 N; 刀具悬长为 25 mm 时, 平均切削力为 4.189 N, 减小了 3.19%; 刀具悬长为 30 mm 时, 平均切削力为 4.057 N, 减小了 3.15%.

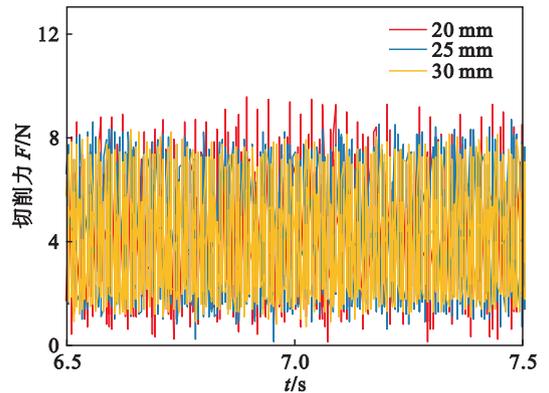


图 8 不同刀具悬长时的切削力

Fig. 8 Cutting forces under different tool lengths

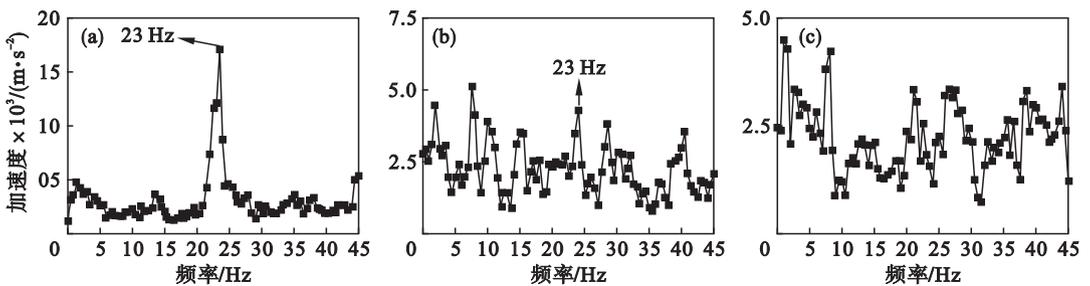


图 9 不同刀具悬长时加速度频谱图

Fig. 9 Acceleration signal spectrum under different tool lengths

(a)—20 mm; (b)—25 mm; (c)—30 mm.

从图 8 中得出,随着刀具悬长的增加,切削力幅值略微减小,相差不大.但采集得到的加速度信号明显看出,当刀具悬长为 20 mm 时出现了机器人固有频率附近的峰值,证明发生了模态耦合颤振.当刀具悬长增加时,该峰值减弱.因此可以得到,刀具悬长越短,越容易发生模态耦合颤振.刀具悬长增大时,刀具柔性较大,振动会被吸收,较少地传递至机器人本体,削弱了模态耦合颤振.

### 3 顺逆铣对模态耦合颤振的影响

采用主轴转速 9 000 r/min,进给速度 15 mm/min,轴向切深 0.1 mm,半槽铣削 Al6061.力传感器和加速度传感器采集得到的信号分别如图 10 和图 11 所示.

顺铣时,平均切削力为 2.529 N.逆铣时,平

均切削力为 4.698 N,增加了约 85.7%.因此,同样切削条件下,逆铣产生更大的切削力.从频谱图分析得到,逆铣时接近机器人固有频率的峰值更加明显.因此,在机器人铣削过程中应避免逆铣,以防止产生更大的切削力和模态耦合颤振.

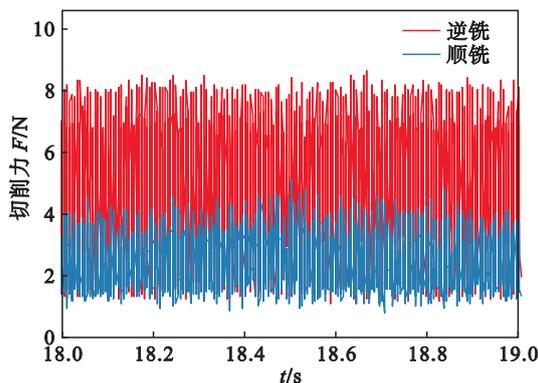


图 10 不同切削方式下的切削力  
Fig. 10 Cutting forces under different milling methods

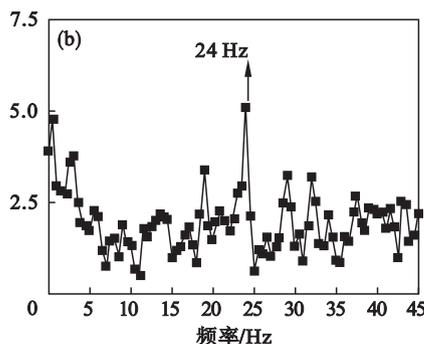
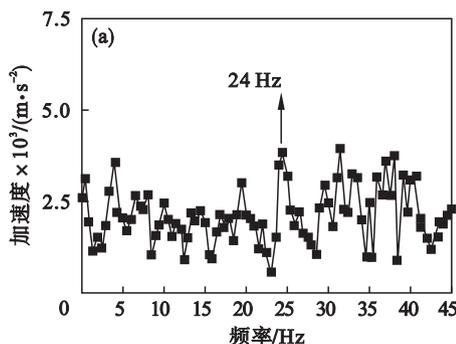


图 11 不同铣削方式下加速度信号频谱图  
Fig. 11 Acceleration signal spectrum under different milling methods  
(a)—顺铣; (b)—逆铣.

### 4 切削工件材料对模态耦合颤振的影响

本文分别以 Al 1060, Al 6061 和 Ti 为工件进行机器人铣削加工.采用主轴转速 9 000 r/min,进给速度 15 mm/min,切削深度 0.05 mm,全槽铣削.得到的切削力和加速度频谱图分别如图 12 和图 13 所示.

切削工件 Al 1060 时,平均切削力为 3.485 N;用 Al 6061 工件切削时,平均切削力为 5.015 N,增加了约 43.9%;用 Ti 工件切削时,平均切削力为 8.897 N,增加了约 77.41%.这是由于 Ti 的硬度比 Al 合金大得多,因此切削力急剧上升.

从频谱图看,铣削越硬的材料越容易发生模态耦合颤振.

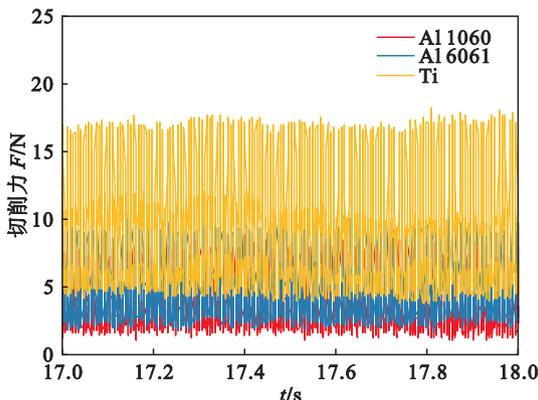


图 12 三种工件材料的切削力  
Fig. 12 Cutting force of three workpiece materials

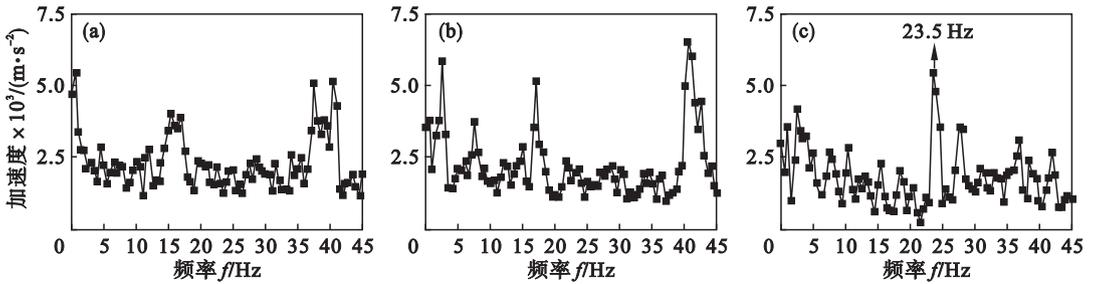


图 13 三种切削材料的加速度频谱图

Fig. 13 Acceleration spectrum for three cutting materials

(a)—Al 1060; (b)—Al 6061; (c)—Ti.

## 5 结 论

1) 主轴转速高低是影响机器人铣削加工稳定性的重要因素之一。低转速铣削时,以模态耦合颤振为主;高转速铣削时,以再生颤振为主。

2) 刀具悬长对于机器人铣削加工稳定性影响较大。悬长较长时,机器人铣削产生的切削能量由于刀具柔性被吸收,较少地传递到机器人本体,因此机器人不容易发生模态耦合颤振,但此时会降低加工精度,且对于刀杆的强度要求较高,否则容易发生断刀。

3) 进给速度越快、切深越大、切削材料硬度较大以及采用逆铣方式时,更容易发生模态耦合颤振。

## 参考文献:

[1] Liu Y, Li T, Liu K, et al. Chatter reliability prediction of turning process system with uncertainties [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2016, 66/67: 232 - 247.

[2] Altintas Y. *Manufacturing automation; metal cutting mechanics, machine tool vibrations, and CNC design* [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2012.

[3] Cheng K. *Machining dynamics: theory, applications and practices* [M]. London: Springer, 2008.

[4] Abele E, Weigold M, Rothenbücher S. Modeling and identification of an industrial robot for machining applications

[J]. *CIRP Annals—Manufacturing Technology*, 2007, 56 (1): 387 - 390.

[5] Gasparetto A. A system theory approach to mode coupling chatter in machining [J]. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 1998, 120(4): 545 - 547.

[6] Pan Z, Zhang H, Zhu Z, et al. Chatter analysis of robotic machining process [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2006, 173(3): 301 - 309.

[7] Cen L, Melkote S N. CCT-based mode coupling chatter avoidance in robotic milling [J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2017, 29: 50 - 61.

[8] Chen S Y, Zhang T, Zou Y B. Fuzzy-sliding mode force control research on robotic machining [J/OL]. *Journal of Robotics*, (2017 - 05 - 18). <https://doi.org/10.1155/2017/8128479>.

[9] 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.  
(Wang Zhan-xi, Zhang Xiao-yu, Li Fei-fei, 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.)

[10] 谭景春, 蔺任志. 机器人铣削系统的研究 [J]. *机械工程师*, 2016(3): 105 - 106.  
(Tan Jing-chun, Lin Ren-zhi. Study on the robot milling system [J]. *Mechanical Engineer*, 2016(3): 105 - 106.)

[11] Mejri S, Gagnol V, Le T P, et al. Dynamic characterization of machining robot and stability analysis [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016, 82(1/2/3/4): 351 - 359.

[12] Mousavi S, Gagnol V, Bouzgarrou B C, et al. Dynamic modeling and stability prediction in robotic machining [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017, 88(9/10/11/12): 3053 - 3065.