

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2025.03.014

高速数控铣削加工时颤动抑制技术研究

李富荣

(银川能源学院, 宁夏 银川 750100)

摘要:在数控铣削加工时会出现因动态不稳定和刀具异常振动带来的机床颤动,其颤动影响精密零件的正常铣削加工。根据建立的低浸没铣削模型,通过 Matlab 软件对铣削不稳定性进行分析,设计不稳定铣削的时频控制器结构模型。通过软件仿真和实际加工对比可见:建立的控制器模型能够有效地抑制数控机床的铣削颤动。

关键词:铣削颤动;不稳定性;时频分析;控制器;加工检测

中图分类号:TH166 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2025)03-0071-06

Research on Chatter Suppression in High-speed NC Milling

LI Furong

(Yinchuan Energy College, Yinchuan 750100, China)

Abstract: The machine tool chatter caused by dynamic instability and abnormal vibration of tool affects the normal milling process of precision parts. Based on the established model of low-immersion milling, its instability is analyzed by Matlab software, and the time-frequency controller structure model of unstable milling is designed. The comparison made between the software simulation and actual process ing shows that the designed controller model can effectively suppress the milling chatter of NC machine tool.

Keywords: milling chatter; instability; time-frequency analysis; controller; processing detection

0 引言

在金属切削中,颤动作为一种有害模式,是由多种复杂因素引起的。在数控加工过程中颤动主要由以下因素引起:

1) 切削参数没有得到合理控制,导致机床工作状态不稳;

2) 机床刚性不足或固定件松动;

3) 刀具磨损变钝或出现断续切削;

4) 伺服系统补偿装置或伺服放大器出现故障;

5) 机械系统出现振动或负载惯量的突变。

在数控加工中可以通过优化切削参数、改善夹持方式,提高系统刚度、调整工作台和主轴的结构,引入智能传感器等方法来减少颤动^[1]。

现代控制理论单独在时域或频域中进行开发,构造的控制器仅仅只能应用在时域或频域中,其只能适用于线性、稳定的系统,对于非线性、不稳定的系统,在频域设计的控制器限制了频率带宽却无法控制时域误差;在时域设计的控制器抑制了时间误差却无法抑制频谱发散;基于频域的

控制器和基于时域的控制器都不足以处理分叉和混动响应问题^[2]。

铣削是一种高度断续的加工过程,高速铣削会导致由动态不稳定和刀具异常振动带来的颤动,其尽管在时域中相关响应有界,但在频域中铣削可能形成不稳定带宽和混沌,且不经意导致其耐受性差、表面粗糙度不合格和刀具损伤^[3];如果开发出一种控制器,能在时域和频域中同步操作,同时在时域和频域中稳定铣刀的非线性响应,并通过对时间和频率响应施加适当的预防措施,这样该控制器将能够有效地抑制铣削颤动^[4]。

1 高速低浸没铣削模型的创建与不稳定性分析

1.1 高速低浸没铣削模型的创建

铣削模型如图 1 所示,该刀具切削刃为偶数,并在恒定的转速 Ω 下进行切削加工,其质量、阻尼系数和弹簧系数分别用 m 、 c 和 k 来表示;进给速度由工件移动速度 V 决定的;铣削运动的动态方程相当于图 1(b)。

基金项目:宁夏回族自治区教育教学改革研究与实践项目(bjg2023120)

作者简介:李富荣(1984—),男,宁夏隆德人,讲师,硕士,研究方向为数控技术,lfr123456@126.com。

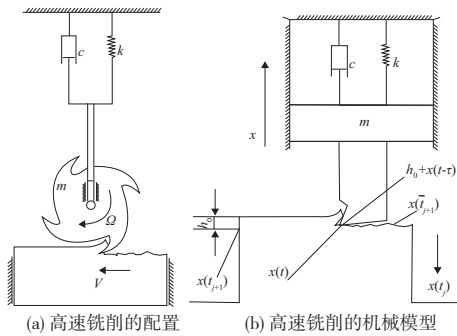


图1 高速铣削机械模型的建立

$$\ddot{x}(t) + 2\xi\omega_n\dot{x}(t) + \omega_n^2x(t) = \frac{\delta(t)}{m}F_c(h(t)) \quad (1)$$

式中: $x(t)$ 是刀尖垂直位置; $\omega_n = \sqrt{c/m}$ 是无阻尼自然频率; $\xi = c/(2m\omega_n)$ 是相对阻尼系数。

非线性切削力 F_c 是根据经验取工件厚度函数 $h(t)$ 的 3/4 阶导数获得的, 即

$$F_c(h(t)) = K\omega [h(t)]^{\frac{3}{4}} \quad (2)$$

式中: K 是一个经验参数; ω 是刀片宽度; $h(t)$ 等于每个切削周期 h_0 的进给加上原先刀尖位置 $x(t-\tau)$ 再减去当前刀尖位置 $x(t)$, 即

$$h(t) = h_0 + x(t-\tau) - x(t) \quad (3)$$

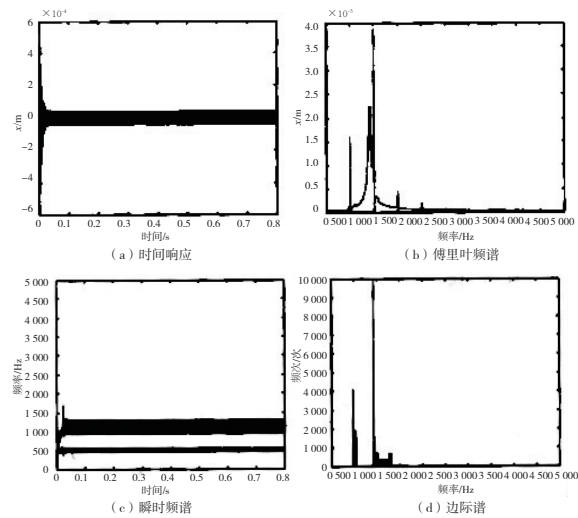
三角函数 $\delta(t)$ 定义为

$$\delta(t) = \begin{cases} 0 & \exists j \in Z: t_j \leq t < t_{j+1}^- \\ 1 & \exists j \in Z: t_{j+1}^- \leq t < t_{j+1} \end{cases} \quad (4)$$

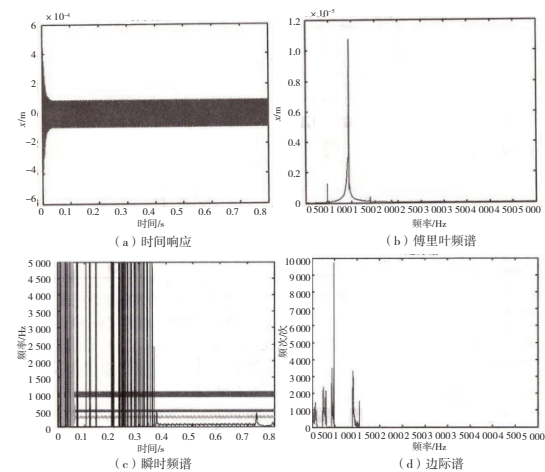
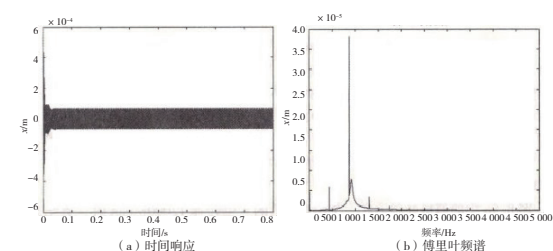
切削力适用于实际切削刀啮合工件时的系统 $t_{j+1}^- \leq t < t_{j+1}$ 。切削刀脱离工件后, 该刀具开始自由振动, 直到下一个刀刃到达 $t_j \leq t < t_{j+1}^-$ 。

1.2 铣削不稳定性分析

刀具质量 m 设定为 0.043 1 kg, 刚度系数 h 取 1.4 MN/m, 阻尼系数 c 取 8.2 NS/m。时间延迟 τ 是由放置的切削刃个数 N 和主轴转速 Ω 而定义的, 即 $\tau = 2\pi/(N\Omega)$ 。其中, 在本研究中 $N=2$, 式(1)中显示了研究混沌路径的过程, 当主轴转速从 15 000 r/min 下降到 12 000 r/min 时, 轴向切削深度 A_{DOC} 维持在 1.0 mm。图 2(a) 给出了主轴转速为 15 000 r/min 时的铣削响应, 其切削过程是振荡幅值小于 0.1 mm 的稳定切削状态^[5]。然而, 其傅里叶频谱图 2(b) 是一个具有多个相对较宽的带宽, 由此可说明其存在动态不稳定性^[6]。当主频率在 1 000 ~ 13 500 Hz, 次频在 500 Hz 左右振荡时, 图 2(c) 所示的瞬时频率图进一步证明了该运动是倍周期分叉。图 2(d) 中相对应的边际谱带宽有限且狭窄, 从而说明其响应是动态稳定的。

图2 $\Omega=15\,000\text{ r/min}$ 、 $A_{\text{DOC}}=1.0\text{ mm}$ 时的铣削分析

当主轴转速为 14 000 r/min, 新的频谱分别为在图 3(c) 和图 3(d) 中所标注出的 500 Hz 分量的 1/2 和 1/4 值, 意味着该响应向着混沌分叉。在图 3(b) 误认为该响应不经历分叉状态。当主轴速度进一步降低到 13 000 r/min 时, 图 4(b) 中的傅里叶频谱和先前具有较低的时间响应幅值的频谱几乎一样^[7]。然而, 在图 4(c) 和图 4(d) 中相应的瞬时频率和边际谱描述了一个情况, 即系统响应正处在不同时间图谱结构的状态中; 随着频率带宽的不断扩大, 该系统即将变为混沌状态^[8]。

图3 $\Omega=14\,000\text{ r/min}$ 、 $A_{\text{DOC}}=1.0\text{ mm}$ 时的铣削分析

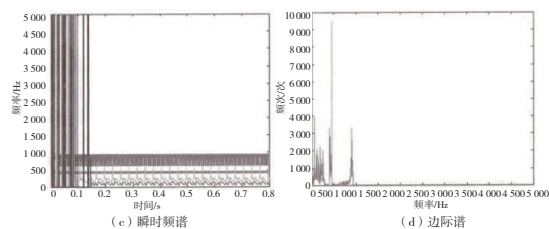
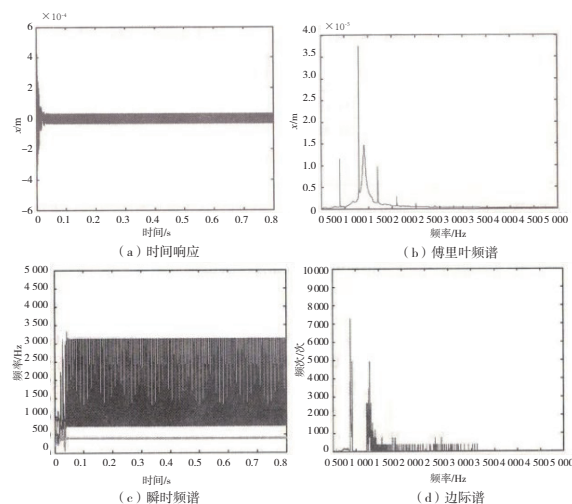
图4 $\Omega=13\,000\text{ r/min}$ 、 $A_{\text{DOC}}=1.0\text{ mm}$ 时的铣削分析

图5(b)中的傅里叶频谱在一个相对低的主轴转速 $12\,000\text{ r/min}$ 时,其结果不直观也不准确。图5(c)中的瞬时频率展示了主频介于 $1\,000\sim 3\,000\text{ Hz}$ 之间的振动,这是其混沌运动的特征;由图5(d)中所示的边际谱进一步证实,即由大量的频率分量构成的宽波段。

图5 $\Omega=12\,000\text{ r/min}$ 、 $A_{\text{DOC}}=1.0\text{ mm}$ 时的铣削分析

由图2—图5可知,尽管傅里叶频谱曲解了响应状态,但是,瞬时频率与边界频谱一起能优化解决混沌路径的过程和动态稳定性的恶化^[9]。

2 铣削不稳定控制

WBFXLMS 算法是一种改进的 FXLMS 算法,该算法主要针对宽带噪声的主动控制问题,在自适应滤波器系数更新时,采用加权处理的方法,以达到更好的宽带噪声抑制效果;经过研究表明,自适应滤波器除了控制噪声外,还可以控制机床的振动^[10]。

在进行高速铣削时,相应的时间响应变成非周期性响应且频率响应偏离清晰的谐波函数,变成不稳定宽带。这种响应是高速非线性响应,并且如果加之适当的注意,该响应可能会造成刀具颤动^[11]。

图6所示给出了根据 Matlab Simulation 算法来实现并执行的相应控制器结构。这种控制器是根据 WBFXLMS 算法,采用 C++ 进行开发的,它以正交 Daubechines-2 小波作为母小波的时频控制器,也称基于小波变换的时频控制器,它可与华中 HNC-8 系列的数控系统进行集成和兼容^[12]。

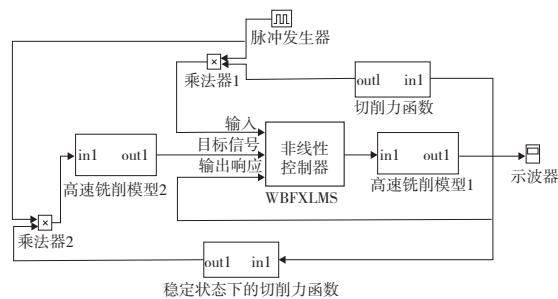


图6 铣削控制算法

基于小波变换的时频控制器标识为 WBFXLMS,图7大致给出了基于小波的时频控制器的控制方案^[13]。

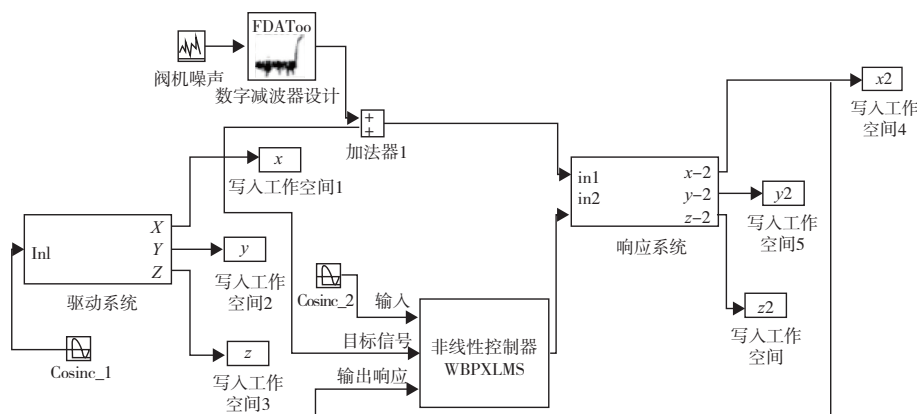


图7 基于小波的时频控制器的控制方案

在主轴转速为 50 000 r/min、 $A_{\text{DOC}}=1.0$ mm 的小型铣削系统中,因为时间响应的振幅仍然很小,所以运动近似为一种稳定的切削,如图 8 所示。然而,在瞬时频率的图中显示了明显的时域模型振动,表现出复杂的非线性振动,这是刀具颤振的前兆;控制器在 0.2 s 后启动,其时间响应和被有效地抑制了。图 9 将受控和不受控的系统响应相位图放在一起进行比较。由两个流形可以看出,该运动在控制器启动前后都是稳定的。然而,尽管控制器刚打开时,运动相位图在同一流域内;从图 9(b)可以看出,其轨迹的刻度和大小明显减少到 1/100。

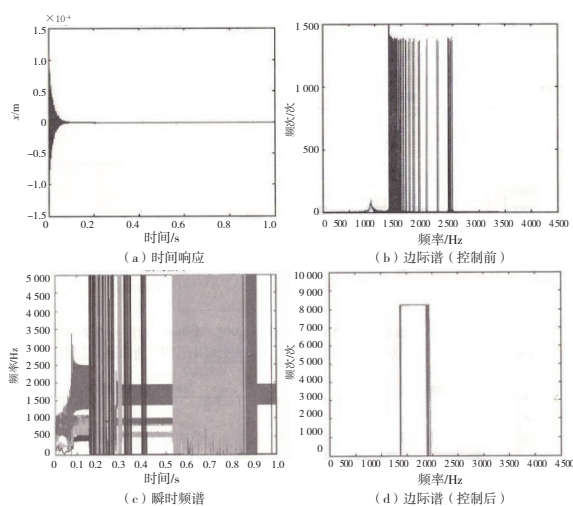


图 8 $\Omega=50\,000$ r/min、 $A_{\text{DOC}}=1.0$ mm、
时间 $t=0.2$ s 时的铣削分析

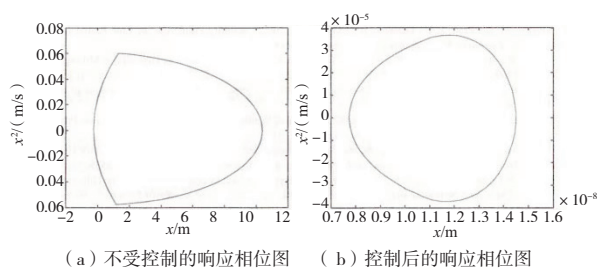


图 9 采用 WBFXLMS 算法控制前后对比

由图 2—图 9 分析可得出:1) 基于小波变换的时频控制器不仅减少了在时域中的异常振动,同时还控制在频域中的图谱响应,因此其可以缓解非线性响应的进一步恶化;2) 在采用了控制器后铣刀运动急剧转换,作为在时域中的低幅振荡,其表现为一个在状态空间中减小的流形,即使控制目标设置为 0,且得到的时域误差很小且满足条件,但是图谱响应不仅包含一个单一的频率,其

频谱也是各不相同的^[14]。

3 铣削稳定性控制器的应用试验研究

3.1 试验方案及实施

本次试验采用华中 HNC-8 系列的立式 3 轴联动加工中心,工件材料为 ZL205A 铝合金,采用新型涂层硬质合金面铣刀,零件是结构较复杂的薄壁异形件(图 10),其在实际加工过程中容易产生振动^[15]。在加工过程中切削深度为 0.5 mm,进给量为 0.12 mm/r,主轴转速为 2 300 r/min^[16]。



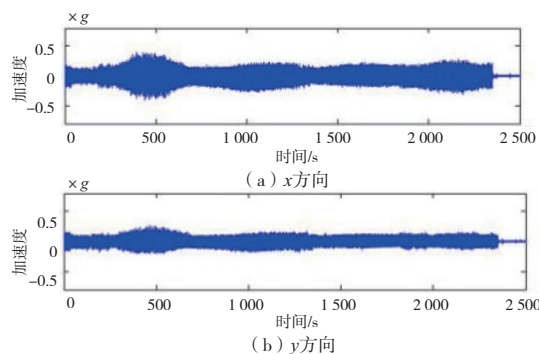
图 10 复杂薄壁件

在振动检测过程中主要以高频采集来进行现场监测。由于主轴振动能够直接反映切削状态,因此将三轴加速度传感器 BMA400 布置在主轴上^[17];主轴前端靠近刀具的位置更能反映加工过程中温度的变化,因此将 KYW-CX1 磁吸式温度传感器粘贴在主轴前端靠近刀具的位置。将 CHG-500FB 精密电流互感器套在主轴电机输出端的电缆上监测主轴的电流。

3.2 试验结果与分析

2 次铣削加工切削参数、刀具几何参数、刀具材料和工艺工装都完全相同。2 次检测的量均是 x 、 y 、 z 方向的加速度、主轴前端的温升和主轴电机输出端电缆上的电流。第 1 次切削时没有应用基于小波变换的时频控制器,第 2 次切削时应用了基于小波变换的时频控制器^[18]。

第 1 次切削加速度如图 11 所示,温度和电流如图 12 所示。



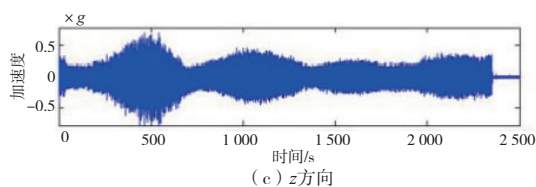
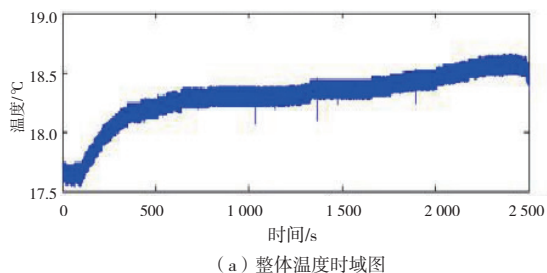
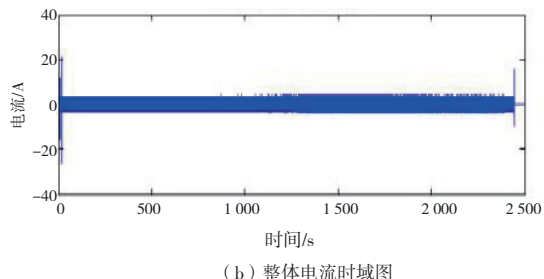


图 11 第 1 次切削加速度图



(a) 整体温度时域图



(b) 整体电流时域图

图 12 第 1 次切削温度和电流图

从图 11 可以看出,整个加工过程中 z 方向振动最大,最大值达到了 $0.5g$ 左右,并且有明显的 4 次波峰出现。这是因为在切削过程中 z 方向所受的切削力比 x 方向和 y 方向大,且造成的冲击也就大。 x 方向出现了 4 次波峰,其中第 1 次波峰值达到了 $0.4g$,其他 3 次波峰不明显,这是因为将切削力沿 x 、 y 、 z 3 个方向分解后, x 方向所受的分力较小,因此其所受冲击也就较小,产生的振动也就小一些。 y 方向振动最小,第 1 次波峰达到了 $0.25g$,其它 3 次波峰不太容易辨识。从图 12 中可以看出,在整个加工过程中温度信号从 17.6°C 逐渐增大到 18.5°C ,刚开始增长速度较快,600 s 之后增长速度缓慢,2 400 s 时加工完成,温度迅速降低。在开始加工时,电流幅值瞬间升高到 20 A,这是因为开始加工时瞬间需要很大的切削力,随后电流稳定在 $-4\text{ A} \sim 4\text{ A}$ 之间,加工完成的瞬间电流幅值升高到 15 A,很快就降低到 0 A。综上可以得出第 1 次切削过程中产生了颤振^[19]。

第 2 次切削加速如图 13 所示,温度和电流如图 14 所示。

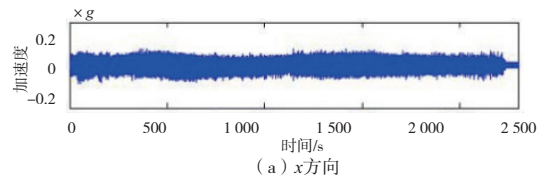
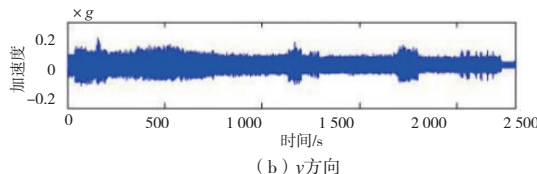
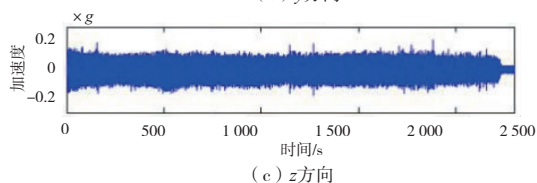
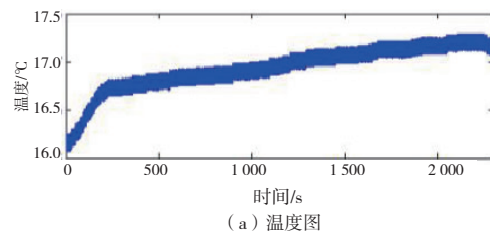
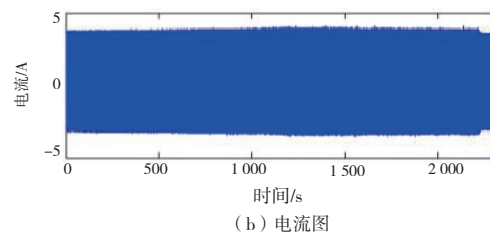
(a) x 方向(b) y 方向(c) z 方向

图 13 第 2 次切削加速度图



(a) 温度图



(b) 电流图

图 14 第 2 次切削温度和电流图

从图 13 中可以看出,在第 2 次切削过程中 3 个方向的整体颤动都比较小, x 方向和 z 方向的加速度信号都很平稳,没有出现波峰, x 方向的加速度信号约在 $0.07g$ 附近波动, z 方向信号约在 $0.09g$ 附近波动, z 方向的信号与 x 方向和 y 方向相比,存在一些小的波动,但 z 方向信号波动的峰值最大也只有 $0.09g$,因此认为 z 方向也是稳定的,没有出现颤振。从图 14 可看出,整个加工过程中温度和电流的变化都要比图 12 平缓。

4 结语

1) 要正确控制一个响应是瞬时且不稳定的非线性系统,其控制规律必须有一定的特性,包括能够实时地辨识系统并且同时在时域和频域上采取缓和的特性。

2) 通过对两个尺寸、结构、材料相同的复杂薄壁件铣削加工,其加工切削参数、刀具几何参数、刀具材料和工艺工装都完全相同的情况下,采用基于小波变换的时频控制器并合理地调整输入参数,能有效地抑制颤动。

3) 常规控制规律设计是以数学上明确的方法来控制系统,而基于小波变换的时频控制器的建立就不需要精确到线性化,其受控的系统固有特性也被完全保留,并能够在不失真的情况下解决其潜在的动态特性。

参考文献:

- [1] 姜魏梁,招瑞丰. 基于扰动观测器的机床加工误差迭代学习控制[J]. 中国工程机械学报,2019,17(5): 427-431.
- [2] 罗军. 模糊控制理论及其在石化装置中的实现[J]. 仪器仪表用户,2019,26(12):11-16,86.
- [3] 薛荣辉. 智能控制理论及应用综述[J]. 现代信息技术,2019,3(22):176-178.
- [4] 柴媛媛. 基于迭代学习算法的工业机器人轨迹跟踪方法研究[D]. 长春:长春工业大学,2019.
- [5] 王轩. 基于 RBF 神经网络的非线性系统对象辨识[J]. 科技创新与应用,2020,10(5):31-33.
- [6] 刘超. 迭代学习控制原理浅述[J]. 智慧工厂,2017(12):78-79.
- [7] 王云德,胡经纬. 机床振动的理论分析和实验测试对工艺的指导作用[J]. 制造业自动化,2019,41(7): 22-23,97.
- [8] 张高尉. 基于西门子 840D 的数控机床生产过程状态监测系统研究[D]. 天津:天津大学,2014.
- [9] 刘超. 机械加工振动分析[M]. 武汉:华中理工大学出版社,2021.
- [10] 祝清伟. 高速数控铣削中刀具磨损对加工精度的影响研究[J]. 中国机械,2024(35):48-51.
- [11] 潘峰. 复杂曲面加工下高速数控铣削刀具磨损故障检测[J]. 装备制造技术,2024(6):129-131,145.
- [12] 谷雨. 碳纤维增强聚合物复合材料在航空航天领域的研究进展[J]. 冶金与材料,2023,15(7):118-120.
- [13] 申翔宇. 基于五轴高速铣削数控机床的航空用芳纶纸蜂窝加工工艺及试验研究[J]. 纤维复合材料,2024,41(3):10-16.
- [14] 聂鹏,马尧,郭勇翼,等. 基于 IPSO 优化 LS-SVM 的铣削刀具磨损状态监测方法研究[J]. 振动与冲击,2022,41(22):137-143.
- [15] 刘华华,许颖,雷波. 数控铣削中编程方法的应用与研究[J]. 机械工程与自动化,2023(1):195-197.
- [16] LI Y J, DUAN Z M, FANG Y, et al. A 32 - 40 GHz 7-bit bi-directional phase shifter with 0.36 DB/1.6° RMS magnitude/phase errors for phased array systems[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers, 2022, 69(10):4000-4013.
- [17] LIAO Y J, TANG M Z, PANG J, et al. A 19 - 34-GHz bridged - T phase shifter with high - pass phase compensation achieving 3.9° RMS phase error for 5G NR[J]. IEEE Solid - State Circuits Letters, 2023, 6: 233-236.
- [18] 苏建宁,祝铎,李雄,等. 视知觉驱动的产品造型感性意象评价方法[J]. 机械设计,2023,40(9):142-148.
- [19] 李辉,郑炜,刘琦,等. 面向数字化工艺设计的MBD模型轻量化技术研究[J]. 机械制造与自动化,2025,54(1):143-145,157.

收稿日期:2024-03-01