

机床铣削加工时的工作模态分析方法

李春辉, 宋志强, 张博, 苏一鸣

北京振兴计量测试研究所

摘要: 机床加工过程中, 获得机床工作状态时的模态参数对提高加工效率和加工质量非常重要。机床工作状态下的固有频率和阻尼比可通过工作模态分析方法获取, 而机床正常加工时的振动信号中包含较强的周期成分, 无法满足工作模态分析的要求。通过研究铣削加工时的响应信号特性, 提出机床工作状态的工作模态分析方案: 根据信号的倒谱特性去除周期振动成分, 再运用工作模态分析从剩余的信号中辨识模态参数。采用龙门铣床切削试验验证了该方案的准确性, 证明此方案可较好地去除振动响应中的周期成分, 并获取准确的固有频率和阻尼比。

关键词: 机床; 谐频; 周期铣削; 工作模态分析; 倒频谱编辑

中图分类号: TG502.14; TH161.6 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1000-7008.2021.10.015

Method of Operational Modal Analysis of Machine Tool under Periodic Milling

Li Chunhui, Song Zhiqiang, Zhang Bo, Su Yiming

Abstract: In high precision machining, the modal parameters of machine tools directly affect the machining quality and efficiency. The operational modal analysis (OMA) is an effective method to identify natural frequencies and damping ratios under operational conditions. However, the vibration signal of the machine tool during operation contains a strong periodic component, which cannot meet the basic requirements of the OMA method. By studying characteristics of response signal in milling, the operational modal analysis under operational conditions is proposed. After removing the periodic vibration component of the signal, modal parameters of machine tools are estimated from the remaining signals. The experimental results show that the proposed approach can eliminate periodic components in vibration signal and obtain accurate modal parameters under the cutting test of gantry milling tool.

Keywords: machine tool; harmonics elimination; periodic milling; operational modal analysis; cepstrum editing

1 引言

在智能制造的大背景下, 企业对数控机床的生产效率和加工质量的要求越来越高^[1]。一般来说, 通过提高材料去除率可获得更高的生产率, 但很可能造成机床颤振^[2,3]。文献[4]使用 chebyshev 多项式算法结合多模态方法预测车削颤振, 但该方法对不同类型机床的适用性较低, 所以通过辨识得到模态参数仍是预测颤振边界的主要方法。

工作模态分析 (OMA) 是机床工作状态下分析

动力学的有效方法, 该理论成立的前提是激励信号满足白噪声假设^[5]。然而, 机床正常工作时, 周期切削导致激励信号和响应信号中均包含强烈的周期成分^[6], 为了避免响应中周期成分的干扰, 文献[7]使用只有一个刀齿的铣刀, 利用主轴随机旋转产生白噪声激励, 从而辨识机床正常工作状态下的模态参数。文献[8]通过分析伺服电机在随机切削条件下的电流信号, 采用工作模态分析方法辨识机床的模态参数。虽然这些研究都取得了一定的成果, 但需要一些特殊条件, 并未在实际加工条件下进行。

在正常加工状态下, 机床的铣削力主要由刀具

收稿日期: 2021年3月

[4] 周军. 铝合金 7050 - T7451 微切削加工机理及表面完整性研究 [D]. 济南: 山东大学, 2010.

[5] 彭臣西, 吴运新, 易守华, 等. JC 本构模型对 7050 铝合金二维切削仿真影响的研究 [J]. 工具技术, 2018, 52(11): 59 - 62.

[6] 武文革, 金属切削原理及刀具 (2 版) [M]. 北京: 电子工业出版社, 2017: 395 - 396.

第一作者: 王一卓, 硕士研究生, 长春理工大学机电工程学院, 130022 长春市

First Author: Wang Yizhuo, Postgraduate, College of Mechanical and Electrical Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China

通信作者: 谢启明, 研究员级高工, 云南北方驰宏光电有限公司, 650217 昆明市

Corresponding Author: Xie Qiming, Professor Senior Engineer, Yunnan North Chihong Photoelectric Co., Ltd, Kunming 650217, China

周期旋转产生的周期力和被加工材料中硬质点随机分布产生的波动力组成^[7-9]。因此机床振动响应包括周期强迫振动和随机振动,后者可用于辨识机床模态参数的输入。为获得正常铣削加工状态下机床的模式参数,首先需去除信号中强烈的周期成分,再应用 OMA 方法对剩余信号进行处理。

为了抑制原始信号中周期成分的影响,文献[10]对倒谱进行了研究。倒谱计算具有解卷积的性质,随机振动成分主要出现在倒谱域的低时段,而周期成分分布在倒谱域的高时段。根据机床的激励特性,提出了在机床正常工作状态下获取固有频率和阻尼比的方案:首先应用倒频谱编辑法去除原始信号的周期成分,再应用 OMA 方法辨识机床的模式参数,分析铣削激励的特性,并通过理论推导介绍倒频谱编辑法,采用倒频谱编辑法和 OMA 方法辨识机床的固有频率和阻尼比,最后得到研究结论。

2 理论背景

2.1 铣削力的激励特性

正常加工状态下,机床铣削力信号主要来源于两部分:①主轴周期旋转带动刀具切削材料产生的周期力能量较高,是原始振动信号的主要组成成分;②被加工材料中随机分布的硬质点导致切削力的波动,产生波动力。机床的振动主要由激励引起,因此加工过程中的振动响应信号也主要由两部分组成:一是周期强迫振动,由激励力中的周期成分激起;二是随机振动,由激励力中的随机波动成分以及环境噪声引起,近似白噪声激励信号。去除原始信号中的周期成分后,剩余波动成分可通过 OMA 方法辨识系统的固有频率和阻尼比。

2.2 去除振动信号中周期成分

倒谱主要分为复倒谱和实倒谱,复倒谱是取信号复频谱对数,进行傅里叶逆变换

$$C_c(\tau) = F^{-1} \{ \ln [F(f)] \} = F^{-1} \{ \ln [A(f)] + j\varphi(f) \} \quad (1)$$

式中, $F(f) = A(f) e^{j\varphi(f)}$ 为复频谱; $A(f)$ 为幅值谱; $\varphi(f)$ 为相位谱。

实倒谱是取信号幅值谱的对数,进行傅里叶逆变换为

$$C_r(\tau) = F^{-1} \{ \ln [|F(f)|] \} = F^{-1} \{ \ln [A(f)] \} \quad (2)$$

系统响应 $y(t)$ 是由激励信号 $f(t)$ 和脉冲响应 $p(t)$ 的卷积组成,有

$$y(t) = f(t) * p(t) \quad (3)$$

将式(3)进行傅里叶变换后得

$$\begin{aligned} Y(f) &= F(f)P(f) = A_f(f)e^{j\varphi_f(f)}A_p(f)e^{j\varphi_p(f)} \\ &= [A_f(f)A_p(f)] [e^{j\varphi_f(f)}e^{j\varphi_p(f)}] \\ &= [A_f(f)A_p(f)] e^{j[\varphi_f(f)+\varphi_p(f)]} \end{aligned} \quad (4)$$

式中, $A_f(f)$ 为激励信号的幅值谱; $A_p(f)$ 为脉冲响应的幅值谱; $e^{j\varphi_f(f)}$ 为激励信号的相位谱; $e^{j\varphi_p(f)}$ 为脉冲响应的相位谱。

求信号幅值谱的对数可得实倒谱 $C_r(\tau)$ 为

$$\begin{aligned} C_r(\tau) &= F^{-1} \{ \ln [|Y(f)|] \} = F^{-1} \{ \ln [A_f(f)A_p(f)] \} \\ &= F^{-1} \{ \ln [A_f(f)] + \ln [A_p(f)] \} \\ &= F^{-1} \{ \ln [A_f(f)] \} + F^{-1} \{ \ln [A_p(f)] \} = C_{r_f}(\tau) + C_{r_p}(\tau) \end{aligned} \quad (5)$$

式中, $C_{r_f}(\tau)$ 、 $C_{r_p}(\tau)$ 分别为激励信号的实倒谱和脉冲响应的实倒谱。可知,实倒谱为激励信号与脉冲响应的和值。

机床铣削加工时,原始振动响应信号见图 1。信号中存在明显的周期成分和波动成分。求原始振动信号的实倒谱(见图 2a),周期强迫振动主要存在于周期倍数处(如 0.05s, 0.1s, 0.15s 等)。

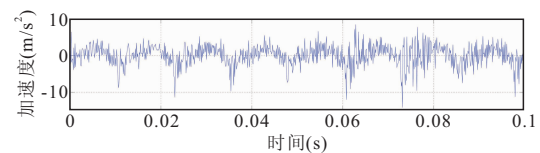
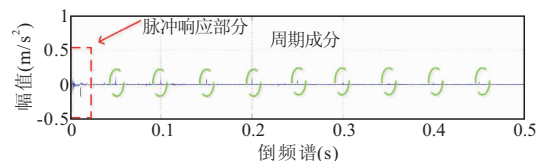
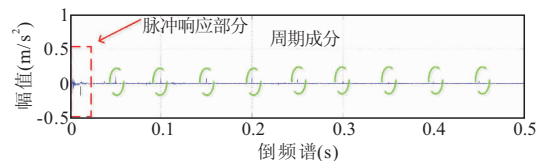


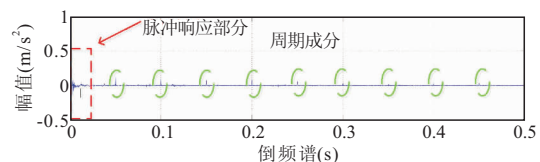
图 1 周期铣削下的原始振动响应信号



(a) 原始信号的实倒谱



(b) 指数窗滤波器



(c) 倒频谱编辑后的实倒谱

图 2 倒频谱编辑流程

为去除信号中的周期成分,采用指数窗滤波器对原实倒谱进行处理,得

$$q(\tau) = e^{-5\tau} \quad (6)$$

指数窗滤波器见图 2b,经过指数窗滤波器处理后信号的实倒谱可表示为

$$C_{r_edited}(\tau) = q(\tau)C_r(\tau) \quad (7)$$

经过指数窗滤波器处理后的实倒谱见图 2c, 信号中的周期成分得到了有效去除, 同时保留了信号的脉冲响应部分。

3 周期铣削激励下模态分析方法验证

为了验证倒频谱编辑法在真实工况下的准确性, 在五轴龙门铣床加工中心上分别进行试验模态分析和工作模态分析。当机床处于静止状态时, 通过敲击试验和试验模态分析获取模态参数, 敲击点选为刀尖点, 锤子型号为 PCB-DYTRAN3224A1, 在主轴上布置型号为 PCB-356-A15 的加速度传感器。当机床处于正常铣削加工状态时, 利用加速度传感器获取数控机床的振动加速度信号, 并应用倒频谱编辑法去除信号中的周期成分, 再应用工作模态分析法从剩余的波动信号中辨识机床的固有频率和阻尼比。

3.1 机床试验模态分析

为了抑制试验过程中噪声的干扰, 敲击试验重复五次后取平均值为试验结果。采集力锤激励的输入信号和加速度传感器在 y 方向上的振动信号, 通过 PolyMAX 算法辨识机床的模态参数。设模态分析阶数为 30, 分析带宽为 250-2000Hz, 计算得到主轴模态稳态图见图 3, 静态敲击下得到的固有频率和阻尼比见表 1。

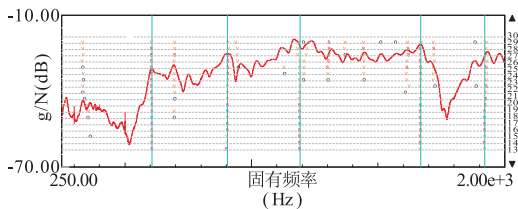


图 3 主轴测点频响函数的稳态图

表 1 敲击试验主轴的固有频率和阻尼比

试验序号	固有频率 (Hz)	阻尼 (%)
1	603.76	3.14
2	901.54	1.77
3	1186.90	5.36
4	1670.33	1.67
5	1927.64	1.16

3.2 铣削激励下的机床工作模态分析

在数控机床切削试验中, 切削力需保证足够大的能量激励力才能辨识得到准确模态参数。因此加工参数设置如下: 主轴转速为 1200r/min, 进给速度为 600mm, 切宽为 8mm, 切深为 1.5mm, 被切削工件为 45 钢。图 4 为切削试验的现场布置图。机床切

削过程中, 图 5 为主轴测点的原始加速度信号, 其中包含明显的周期成分。

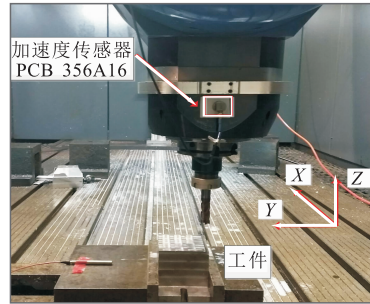


图 4 切削试验现场

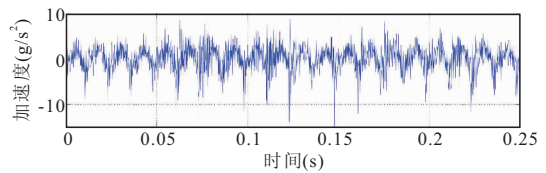


图 5 原始加速度信号

为了抑制信号中周期成分对辨识模态参数的干扰, 对原始振动信号进行倒频谱编辑处理。经过倒频谱编辑处理后, 原始自功率谱与倒频谱编辑后信号的自功率谱对比见图 6。由图可知, 原始信号的谐频及倍频在倒频谱编辑后被去除, 周期成分得到了有效的去除。剩余信号部分保留了原始自功率谱的大体轮廓, 可用于工作模态分析。

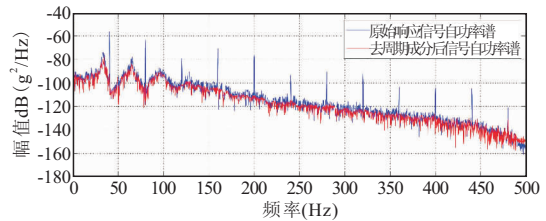


图 6 原始信号与倒频编辑后信号的自功率谱对比

采用 LMS. TestLab 软件中的 Op. PolyMAX 算法对倒频谱编辑后的剩余信号进行模态参数辨识。为了与传统试验模态分析保持一致, 辨识过程中的模态阶数和分析频带参数的设置与 PolyMAX 分析过程相同。图 7 为倒频谱编辑后信号的模态稳态图。根据稳态图中自功率谱和极点队列的分布可知, 各阶模态均得到了有效辨识。

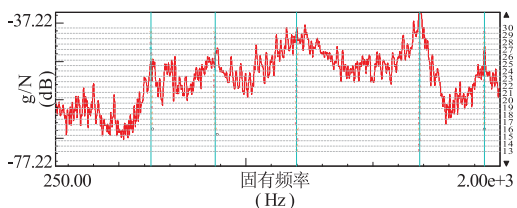


图 7 倒频谱编辑后的主轴信号的稳态图

表2 铣削状态下主轴的固有频率和阻尼比

试验序号	固有频率(Hz)	阻尼(%)
1	625.88	0.71
2	878.50	0.98
3	1198.93	2.35
4	1684.08	0.46
5	1938.72	0.24

由静止与铣削状态下得到的固有频率和阻尼比对比可知(见表1和表2):①不同状态下,同阶模态频率均有偏差,但偏差均不超过 $\pm 5\%$;②当模态阶数增加时,不同状态下、同阶次固有频率的差异百分比逐渐减小;③各阶模态阻尼比差异较大。

机床固有频率和阻尼比在不同状态下存在差异的可能原因如下:①两种方法的激励方式和频带不同,试验模态分析中的锤击力可近似为宽频脉冲信号,但工作模态分析中的激励力频带较小,不能充分激发所有的模态;②与静止状态相比,机床的边界条件发生变化,机床运行状态下的物理特性(质量矩阵、刚度矩阵和阻尼矩阵)不同,所以动力学特性也会存在差异。

4 结语

机床正常切削加工下的振动信号主要由周期信号和波动信号组成,在倒谱域中波动信号在低时段,而周期成分在高时段。为抑制周期成分对模态参数辨识的干扰,通过倒频谱编辑法去除信号中强烈的周期成分,再对剩余信号进行工作模态分析,从而辨识固有频率和阻尼。

在龙门铣床铣削试验中,该方法的准确性和可靠性得到了验证,证明该方法可以很好地去除大量的谐频干扰,也可很好地获取正常铣削条件下机床的固有频率和阻尼。因此,该方法有助于在稳定的铣削区域提高机床的加工效率,避免颤振的发生。

参考文献

- [1]周济. 智能制造——“中国制造2025”的主攻方向[J]. 中国机械工程,2015,26(17):2273-2284.
 [2]卢明明,周家康,林洁琼,等. 混联驱动三维椭圆振动切

- 削颤振辨识方法的研究[J]. 机械设计与制造,2019(4):35-38.
 [3]代艳霞. 铝合金薄壁件的铣削加工颤振的建模与识别[J]. 机械设计与制造,2017(5):109-112.
 [4]Urbikain G, De Lacalle L N L, Campa F J, et al. Stability prediction in straight turning of a flexible workpiece by collocation method[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture,2012,54-55(3-4):73-81.
 [5]Luo B, Pan D, Cai H, et al. A method to predict position-dependent structural natural frequencies of machine tool[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture,2015,92(5):72-84.
 [6]Zaghbani I, Songmene V. Estimation of machine-tool dynamic parameters during machining operation through operational modal analysis[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture,2009,49(12-13):947-957.
 [7]Li B, Cai H, Mao X, et al. Estimation of CNC machine-tool dynamic parameters based on random cutting excitation through operational modal analysis[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture,2013,71(8):26-40.
 [8]Liu X, Mao X, Liu H, et al. Method for identifying feed-drive system dynamic properties using a motor current[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture,2016,110(11):92-99.
 [9]秦潮. 周期切削激励下的数控机床模态参数辨识方法研究[D]. 武汉:华中科技大学,2018.
 [10]Randall R B, Coats M D, Smith W A. Repressing the effects of variable speed harmonic orders in operational modal analysis[J]. Mechanical Systems and Signal Processing,2016,79(10):3-15.

第一作者:李春辉,工程师,北京振兴计量测试研究所,100074北京市

First Author: Li Chunhui, Engineer, Beijing Zhenxing Institute of Metrology and Measurement, Beijing 100074, China

通信作者:宋志强,高级工程师,北京振兴计量测试研究所,100074北京市

Corresponding Author: Song Zhiqiang, Senior Engineer, Beijing Zhenxing Institute of Metrology and Measurement, Beijing 100074, China